

**TUGAS AKHIR – TL184834**

**PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME ARTIFICIAL AGING*  
TERHADAP KARAKTERISTIK *FOAM* PADUAN Al-Mg-Si  
DENGAN *FOAMING AGENT* CaCO<sub>3</sub> DAN *STABILIZER* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

**BAGASTIA ALIEF SAFANO**  
NRP. 02511840000075

Dosen Pembimbing  
Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.  
NIP. 198405152014042003  
Sutarsis, S.T., M.Sc., Ph.D.  
NIP. 197708172005011001

**Program Studi Teknik Material**  
Departemen Teknik Material dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2022





TUGAS AKHIR – TL184834

**PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME ARTIFICIAL AGING*  
TERHADAP KARAKTERISTIK *FOAM* PADUAN Al-Mg-Si  
DENGAN *FOAMING AGENT* CaCO<sub>3</sub> DAN *STABILIZER* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

**BAGASTIA ALIEF SAFANO**  
NRP. 0251184000075

Dosen Pembimbing  
**Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.**  
NIP. 198405152014042003  
**Sutarsis, S.T., M.Sc., Ph.D.**  
NIP. 197708172005011001

**Program Studi Teknik Material**  
Departemen Teknik Material dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2022

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



**FINAL PROJECT – TL184834**

**EFFECT OF ARTIFICIAL AGING HOLDING TIME  
VARIATION ON THE CHARACTERISTICS OF Al-Mg-Si  
ALLOY FOAM MADE WITH  $\text{CaCO}_3$  FOAMING AGENT AND  
 $\text{Al}_2\text{O}_3$  STABILIZER**

**BAGASTIA ALIEF SAFANO**  
NRP. 02511840000075

Advisor

**Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.**

NIP. 198405152014042003

**Sutarsis, S.T., M.Sc., Ph.D.**

NIP. 197708172005011001

**Study Program of Materials Engineering**

Departement of Materials and Metallurgical Engineering

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

*(This page is intentionally blank)*

## LEMBAR PENGESAHAN

### PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME ARTIFICIAL AGING* TERHADAP KARAKTERISTIK *FOAM* PADUAN Al-Mg-Si DENGAN *FOAMING AGENT* CaCO<sub>3</sub> DAN *STABILIZER* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



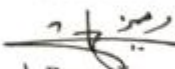

#### TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat  
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada  
Program Studi S-1 Teknik Material  
Departemen Teknik Material dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : BAGASTIA ALIEF SAFANO  
NRP. 0251184000075

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc
2. Sutarsis, S.T., M.Sc., Ph.D.
3. Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc.
4. Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.

  
Pembimbing  
  
Ko-Pembimbing  
  
Penguji  
  
Penguji



**SURABAYA**  
**Juli, 2022**

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## APPROVAL SHEET

### EFFECT OF ARTIFICIAL AGING HOLDING TIME VARIATION ON THE CHARACTERISTICS OF Al-Mg-Si ALLOY FOAM MADE WITH $\text{CaCO}_3$ FOAMING AGENT AND $\text{Al}_2\text{O}_3$ STABILIZER


#### FINAL PROJECT


Submitted to fulfill one of the requirements  
for obtaining a degree of bachelor of engineering at  
Undergraduate Study Program of Materials Engineering  
Department of Materials and Metallurgical Engineering  
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember


By : **BAGASTIA ALIEF SAFANO**  
NRP. 0251184000075


Approved by Final Project Examiner Team :

1. Dian Mughni Fellicia, S.T., M.T.
2. Sutarsis, S.T., M.Sc., Ph.D.
3. Tubagus Noor Rohmannudin, S.T., M.Sc.
4. Mavindra Ramadhani, S.T., M.T.

  
Advisor

  
Co-Advisor

  
Examiner

  
Examiner



**SURABAYA**  
July, 2022

*(This page is intentionally blank)*

## PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:


Nama mahasiswa/NRP : Bagastia Alief Safano/0251184000075  
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi  
Dosen Pembimbing/NIP : Dian Mughni Fellicia, S.T., M.T.  
/198405152014042003

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME ARTIFICIAL AGING* TERHADAP KARAKTERISTIK *FOAM* PADUAN Al-Mg-Si DENGAN *FOAMING AGENT* CaCO<sub>3</sub> DAN *STABILIZER* AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>" adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 26 Juli 2022

Mengetahui  
Dosen Pembimbing



(Dian Mughni Fellicia, S.T., M.T.)  
NIP. 198405152014042003

Mahasiswa



(Bagastia Alief Safano)  
NRP. 0251184000075

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

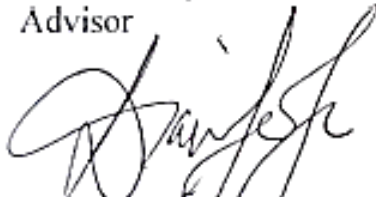
Name of student/NRP : Bagastia Alief Safano/0251184000075  
Departement : Materials and Metallurgical Engineering  
Advisor/NIP : Dian Mughni Fellicia, S.T., M.T.  
/198405152014042003

Hereby declare that the Final Project with the title of "EFFECT OF ARTIFICIAL AGING HOLDING TIME VARIATION ON THE CHARACTERISTICS OF Al-Mg-Si ALLOY FOAM MADE WITH  $\text{CaCO}_3$  FOAMING AGENT AND  $\text{Al}_2\text{O}_3$  STABILIZER" is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing..

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 26 Juli 2022

Acknowledged  
Advisor



(Dian Mughni Fellicia, S.T., M.T.)  
NIP. 198405152014042003

Student



(Bagastia Alief Safano)  
NRP. 0251184000075

*(This page is intentionally blank)*

**PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME ARTIFICIAL AGING* TERHADAP  
KARAKTERISTIK *FOAM* PADUAN Al-Mg-Si DENGAN *FOAMING AGENT* CaCO<sub>3</sub>  
DAN *STABILIZER* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

**Nama Mahasiswa / NRP** : Bagastia Alief Safano / 02511840000075  
**Departemen** : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS  
**Dosen Pembimbing 1** : Dian Mughni Fellicia, S.T., M.T.  
**Dosen Pembimbing 2** : Sutarsis, S.T., M.T.

**Abstrak**

Busa aluminium merupakan yang merupakan aluminium padat yang memiliki pori hasil dari pembentukan gas dalam pengecoran. Dalam penelitian ini, dilakukan pengecoran menggunakan paduan Al-Mg-Si, dengan kandungan Mg 0,8 - 1,2 dan Si 0,4 - 0,8. Pengecoran busa aluminium dilakukan menggunakan metode *stir casting* dengan temperatur leleh 750°C. Lalu ditambahkan *stabilizer* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sebanyak 5% dan *foaming agent* berupa CaCO<sub>3</sub> sebanyak 1% ditambahkan pada lelehan paduan Al dan diaduk. Proses pengadukan kedua penambahan material pada lelehan dilakukan selama 30 detik. Busa aluminium yang sudah terbentuk kemudian dipanaskan kembali pada proses *solution treatment* pada 580°C selama 100 menit dan diquench dalam air. Setelah itu, dilakukan variasi *age hardening* dalam *furnace* selama 5; 6; dan 7 jam pada temperatur 165°C dan dilakukan pendinginan udara. Dari diberikannya variasi *holding time artificial aging* selama 5, 6, dan 7 jam, dihasilkan pertumbuhan presipitat Mg<sub>2</sub>Si yang dapat dilihat dari hasil pengujian densitas, porositas, SEM-EDX, dan XRD. Pengujian densitas dan porositas tidak menunjukkan adanya tren atau perubahan dari perlakuan panas. Dari ketiga variasi waktu, spesimen AA5 memiliki sifat fisik terendah dengan 4 *peak* Mg<sub>2</sub>Si yang terdeteksi pada XRD dan persentase Mg<sub>2</sub>Si sebanyak 1,229% yang dihitung dari hasil uji SEM-EDX. Nilai tertinggi terdapat pada spesimen AA7 dengan 5 *peak* yang terdeteksi dan persentase Mg<sub>2</sub>Si sebesar 1,556%. Dengan tumbuhnya Mg<sub>2</sub>Si, dihasilkan perubahan sifat mekanik yang dapat dilihat dari pengujian kompresi dan impak. Spesimen AA5 memiliki sifat mekanik terendah dari ketiga variasi waktu dengan nilai *plateau stress* sebesar 70,645 MPa, *plateau end stress* sebesar 91,839 MPa, *energy absorption* sebesar 16,879 MJ/m<sup>3</sup>, serta *impact strength* sebesar 4,476 kJ/m<sup>2</sup>. Nilai tertinggi terdapat pada spesimen AA7 memiliki sifat mekanik paling tinggi, dengan nilai *plateau stress* sebesar 85,589 MPa, *plateau end stress* sebesar 111,266 MPa, *energy absorption* sebesar 17,343 MJ/m<sup>3</sup>, serta *impact strength* sebesar 5,250 kJ/m<sup>2</sup>. Dengan ini, dapat disimpulkan bahwa semakin lama *holding time artificial aging*, maka kapabilitas mekanik *aluminium foam* akan semakin meningkat. Dengan ini, dapat disimpulkan bahwa semakin lama *holding time artificial aging*, maka kapabilitas mekanik *aluminium foam* akan semakin meningkat.

**Kata Kunci:** *aluminium foam, kalsium karbonat, magnesium silisida, presipitat*

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



# EFFECT OF ARTIFICIAL AGING HOLDING TIME VARIATION ON THE CHARACTERISTICS OF Al-Mg-Si ALLOY FOAM MADE WITH CaCO<sub>3</sub> FOAMING AGENT AND Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> STABILIZER

**Student Name / NRP** : Bagastia Alief Safano / 02511840000075  
**Departement** : Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS  
**Advisor 1** : Dian Mughni Fellicia, S.T., M.T.  
**Advisor 2** : Sutarsis, S.T., M.Sc., Ph.D.

## Abstract

Aluminium foam is a solid aluminium with pores that is made by gas formed during casting. In this research, Al-Mg-Si alloy foam with 0,8 - 1,2 Mg dan 0,4 - 0,8 Si is made through the melt route, casted at 750°C. 5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> stabilizer and 1% CaCO<sub>3</sub> foaming agent are added to the melt and stirred at 30 seconds each. The resulting Al foams are then heated back to 580°C in solution treatment process for 100 minutes and then quenched in water. Then, the spesimens are heated once more in aging process with holding time variations of 5, 6, and 7 hours at 165°C and cooled in open air. The treated aluminium foams are then cut using wire cutting method into the standard dimensions of the tests. From the variation of holding time artificial aging for 5, 6, and 7 hours, the resulting growth of MgSi precipitates can be seen from the results of density, porosity, SEM-EDX, and XRD tests. All specimens show no trend or change of density, and can be thus concluded that precipitation hardening have no effect on it. Among the three variations, AA5 specimen has the lowest physical properties with 4 peaks of Mg<sub>2</sub>Si detected on XRD and the percentage of Mg<sub>2</sub>Si is 1,229% which is calculated from the results of the SEM-EDX test. The AA7 specimen has the highest detected peaks of 5 and the percentage of Mg<sub>2</sub>Si was 1,556%. With the growth of Mg<sub>2</sub>Si precipitates, changes in mechanical properties are produced which can be seen from compression and impact tests. Spesimen AA5 has the lowest mechanical properties among the three aging variations with a plateau stress value of 70,645 MPa, a plateau end stress of 91,839 MPa, energy absorption of 16,879 MJ/m<sup>3</sup>, and an impact strength of 4.476 kJ/m<sup>2</sup>. Spesimen AA7 has the highest mechanical properties, with a plateau stress value of 85,589 MPa, a plateau end stress of 111,266 MPa, energy absorption of 17,343 MJ/m<sup>3</sup>, and an impact strength of 5,250 kJ/m<sup>2</sup>. With this, it can be concluded that the longer the holding time of artificial aging, the mechanical capability of aluminum foam will increase.

**Keywords:** *aluminium foam, calcium carbonate, magnesium silicide, precipitate*

*(This page is intentionally blank)*

## KATA PENGANTAR

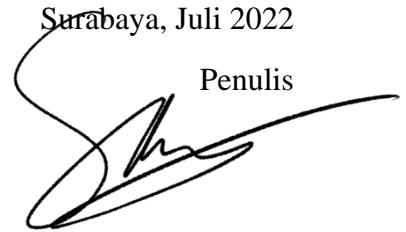
Alhamdulillah, Puji dan Syukur atas kehadiran Allah SWT. yang telah memberikan rahmat, inayah, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Proposal Tugas Akhir dengan judul “PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME ARTIFICIAL AGING* TERHADAP KARAKTERISTIK *FOAM* PADUAN Al-Mg-Si DENGAN *FOAMING AGENT* CaCO<sub>3</sub> DAN *STABILIZER* AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>”. terselesaikannya Proposal Tugas Akhir ini tidak luput dari dukungan, bantuan, motivasi serta partisipasi dari semua pihak, untuk itu penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir dan selaku dosen wali yang senantiasa memberikan arahan selama masa perkuliahan.
2. Bapak Sutarsis, S.T., M.Sc. Ph.D. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir atas segala ilmu dan bimbingan yang telah diberikan selama pelaksanaan Tugas Akhir hingga penyusunan Laporan Tugas Akhir.
3. Bapak Sigit Tri Wicaksono S.Si., M.Si., Ph.D., selaku Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS.
4. Bapak/Ibu Dosen yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu kepada penulis.
5. Orang tua, Keluarga, dan teman dekat penulis yang selalu memberikan dukungan kepada penulis.

Penulis menyadari bahwa penyusunan proposal ini masih jauh dari kesempurnaan. Untuk itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca.

Surabaya, Juli 2022

Penulis



Bagastia Alief Safano

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR ISI

Abstrak .....	xiii
Abstract .....	xv
KATA PENGANTAR .....	xvii
DAFTAR ISI .....	xix
DAFTAR GAMBAR .....	xxi
DAFTAR TABEL .....	xxiii
<b>1 BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	1
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Batasan Masalah .....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	2
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>3</b>
2.1 Aluminium.....	3
2.1.1 Paduan Al-Mg-Si.....	3
2.2 <i>Aluminium Foam</i> .....	4
2.2.1 Karakteristik dan Sifat Mekanik <i>Aluminium Foam</i> .....	4
2.2.2 Aplikasi Aluminium Foam .....	6
2.3 Metode Produksi <i>Aluminium Foam</i> .....	8
2.4 <i>Foaming Agent</i> CaCO <sub>3</sub> .....	9
2.5 <i>Stabilizer</i> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	10
2.6 <i>Precipitation Hardening</i> .....	11
2.7 Penelitian Sebelumnya .....	12
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>17</b>
3.1 Diagram Alir.....	17
3.2 Bahan Penelitian .....	19
3.3 Alat Penelitian .....	19
3.4 Instrumen Pengujian .....	19
3.5 Metode Penelitian .....	19
3.6 Proses Pengujian.....	21
3.7 Rancangan Penelitian .....	22
3.8 Jadwal Penelitian .....	23
<b>BAB IV hasil DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>25</b>
4.1 Hasil Pengujian Komposisi .....	25
4.2 Hasil Pengujian Densitas dan Porositas.....	25
4.3 Hasil Pengujian Mikroskop Stereo .....	26
4.4 Hasil Pengujian SEM-EDX.....	27
4.5 Hasil Pengujian XRD .....	29
4.6 Hasil Pengujian Kompresif.....	30
4.7 Hasil Pengujian Impak .....	32
4.8 Korelasi Antara Karakteristik Fisik dan Mekanik <i>Foam</i> Paduan Al-Mg-Si .....	34
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>35</b>
5.1 Kesimpulan.....	35
5.2 Saran .....	35
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>37</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>41</b>

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b>	Perbandingan penyerapan energi foam logam dan logam padat.....	4
<b>Gambar 2. 2</b>	Metode menentukan <i>strain</i> densifikasi .....	5
<b>Gambar 2. 3</b>	Aluminium foam <i>open cell</i> dan <i>closed cell</i> .....	5
<b>Gambar 2. 4</b>	Hasil uji optik dari struktur aluminium foam .....	6
<b>Gambar 2. 5</b>	Lokasi <i>crash box</i> pada struktur depan mobil .....	7
<b>Gambar 2. 6</b>	Bentuk optimal dari <i>crash box</i> .....	7
<b>Gambar 2. 7</b>	<i>Bumper</i> yang sedang diuji.....	7
<b>Gambar 2. 8</b>	Proses produksi foam logam menggunakan metode injeksi gas.....	8
<b>Gambar 2. 9</b>	Proses produksi foam logam dengan metode penambahan <i>foaming agent</i> .....	9
<b>Gambar 2. 10</b>	Kerusakan pada sel aluminium foam.....	10
<b>Gambar 2. 11</b>	Drainase pada aluminium foam.....	10
<b>Gambar 2. 12</b>	Pengaruh penambahan $Al_2O_3$ (0% – 10%) pada struktur sel dan densitas.....	11
<b>Gambar 2. 13</b>	Diagram fasa Al-Mg <sub>2</sub> Si.....	11
<b>Gambar 2. 14</b>	Pengaruh durasi <i>aging</i> pada presipitat yang terbentuk dan kekuatannya.....	12
<b>Gambar 3. 1</b>	Diagram alir penelitian.....	18
<b>Gambar 3. 2</b>	Skema proses <i>precipitation hardening</i> .....	20
<b>Gambar 4. 1</b>	Hasil pengujian densitas pada spesimen.....	25
<b>Gambar 4. 2</b>	Hasil perhitungan porositas pada spesimen.....	26
<b>Gambar 4. 3</b>	Hasil pengujian mikroskop stereo pada permukaan dari 4 sampel spesimen: (a) Non-HT, (b) AA5, (c) AA6, (d) AA7.....	27
<b>Gambar 4. 4</b>	Hasil pengamatan SEM, menunjukkan spesimen (a) Non-HT, (b) AA5, (c) AA6, dan (d) AA7.....	28
<b>Gambar 4. 5</b>	Hasil analisis EDX pada spesimen: (a) Non-HT, (b) AA5, (c) AA6, dan (d) AA7.....	29
<b>Gambar 4. 6</b>	Hasil pengujian XRD dari spesimen.....	30
<b>Gambar 4. 7</b>	<i>Average plateau stress</i> pada spesimen.....	31
<b>Gambar 4. 8</b>	<i>Plateau end stress</i> pada spesimen.....	31
<b>Gambar 4. 9</b>	Absorpsi energi pada spesimen.....	32
<b>Gambar 4. 10</b>	Hasil pengujian impak pada spesimen.....	33
<b>Gambar 4. 11</b>	Hasil konversi energi impak ke kekuatan impak.....	33

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2. 1</b> Sifat mekanik dan fisik dari alumium murni. ....	3
<b>Tabel 2. 2</b> Elemen paduan dari Aluminium 6061. ....	3
<b>Tabel 2. 3</b> Penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. ....	12
<b>Tabel 3. 1</b> Rancangan penelitian. ....	22
<b>Tabel 3. 2</b> Jadwal penelitian. ....	23
<b>Tabel 4. 1</b> Hasil uji <i>Spark</i> OES material Al <i>bulk</i> . ....	25
<b>Tabel 4. 2</b> Ukuran pori dari spesimen. ....	27

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Aluminium (Al) merupakan elemen paling banyak ketiga di kerak bumi, dan elemen logam yang paling banyak. Aluminium secara natural tidak tersedia dalam bentuk dasar elementalnya, namun selalu tercampur dalam senyawa (Lumley, 2010). Aluminium memiliki densitas yang rendah. Hal inilah yang memberikan aluminium berat yang sangat ringan dibandingkan logam-logam lainnya. Karena densitasnya yang rendah tersebut, aluminium banyak digunakan dalam aplikasi benda yang memerlukan kekuatan tinggi, namun juga massa yang ringan (Yusof et al., 2017).

Salah satu aplikasi dari aluminium adalah sebagai material *crash box*. *Crash box* merupakan bagian dari kendaraan bermotor yang didesain untuk menyerap energi saat terjadi tabrakan, meminimalisir kerusakan di bagian lain dan mengurangi beban tabrakan. Untuk mencapai tujuan tersebut, *crash box* harus memiliki kemampuan untuk hancur terlebih dahulu sebelum bagian lain untuk menyerap energi. Melihat hal ini, aluminium merupakan material yang cocok untuk aplikasi tersebut (Yusof et al., 2017).

Namun, dalam beberapa tahun terakhir telah dilakukan beberapa penelitian untuk terus mengurangi massa material tanpa mengurangi kemampuan mekaniknya. Salah satu usaha tersebut adalah pengembangan foam logam, yaitu produk metal dengan bentuk apapun yang memiliki lubang kecil (porositas) yang banyak, membuat logam menyerupai sebuah foam (Sosnick, 1948). Pembuatan aluminium foam, atau *aluminium foam*, pada umumnya dibuat menggunakan *foaming agent*  $TiH_2$ . Namun, seiring berkembangnya penelitian di bidang ini, ditemukan bahwa  $TiH_2$  sebagai *foaming agent* sangatlah tidak efektif. Oleh karena itu, digunakan beberapa *foaming agent* lainnya, seperti  $CaCO_3$ , yang memiliki berbagai macam kelebihan seperti harganya yang jauh lebih murah dibandingkan  $TiH_2$  dan temperatur dekomposisinya yang menyerupai aluminium (Kevorkijan, 2010).

Penelitian ini dilakukan melanjutkan penelitian sebelumnya oleh Vian Putra Sanjaya, dengan penelitian yang membahas pengaruh perlakuan panas pada karakteristik dan sifat mekanik aluminium foam 6061. Dari penelitian tersebut, ditemukan bahwa *precipitation hardening* merupakan metode perlakuan panas yang paling efektif, namun, tidak dibahas *holding time* yang paling efektif (Sanjaya, 2022). Dalam penelitian ini, dilakukan produksi *aluminium foam closed-cell* menggunakan *foaming agent*  $CaCO_3$  sebanyak 1% dan *stabilizer*  $Al_2O_3$  sebanyak 5%. Bahan baku yang digunakan adalah aluminium 6061 dan metode pembuatannya adalah dengan cara *stir casting*. Setelah pengecoran, material diberi perlakuan panas *solution treatment* selama 100 menit pada  $530^\circ C$ . Setelah itu, material dicelupkan ke air untuk proses *quenching*. Dalam penelitian ini, variasi yang digunakan adalah variasi *holding time* pada proses setelah *quenching*, yaitu proses *artificial aging*, yang dilakukan pada  $165^\circ C$  dengan variasi waktu 5, 6, dan 7 jam. Hasil pengecoran diuji dalam pengamatan mikroskop stereo, pengujian densitas dan porositas, pengujian SEM, XRD, kompresi, dan impak.

## 1.2 Perumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Pengaruh variasi *holding time* pada *artificial aging* terhadap sifat fisik *aluminium foam*.
2. Pengaruh variasi *holding time* pada *artificial aging* terhadap sifat mekanik *aluminium foam*.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Untuk menjawab masalah yang telah dirumuskan, penelitian ini memiliki tujuan untuk:

1. Menganalisis pengaruh variasi *holding time* pada *artificial aging* terhadap sifat fisik *aluminium foam*.
2. Menganalisis pengaruh variasi *holding time* pada *artificial aging* terhadap sifat mekanik *aluminium foam*.

### 1.4 Batasan Masalah

Dalam penelitian, beberapa permasalahan akan diabaikan:

1. Kecepatan penguangan dianggap konstan.
2. Reaksi antara logam cair dan lingkungan diabaikan.
3. Laju kenaikan temperatur *crucible* diabaikan.
4. Laju pendinginan setelah perlakuan panas dianggap konstan.
5. Massa aluminium *loss* diabaikan.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Dengan dilakukannya penelitian ini, didapatkan berbagai data yang diperoleh dari penelitian pengaruh variasi *holding time artificial aging* terhadap karakteristik dan sifat mekanik aluminium foam. Dengan data tersebut, diharapkan dapat mendukung penelitian selanjutnya dengan topik serupa dan dapat membantu aplikasi aluminium foam dalam beberapa bidang, seperti pada *crash box*.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Aluminium

Aluminium (Al) merupakan elemen paling banyak ketiga di kerak bumi, dan elemen logam yang paling banyak. Aluminium secara natural tidak tersedia dalam bentuk dasar elementalnya, namun selalu tercampur dalam senyawa (Lumley, 2010). Aluminium memiliki densitas  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , hanya sepertiga dari baja ( $7,83 \text{ g/cm}^3$ ), tembaga ( $8,93 \text{ g/cm}^3$ ), atau kuningan ( $8,53 \text{ g/cm}^3$ ). Aluminium juga menunjukkan tingkat ketahanan korosi yang tinggi. Selain itu, aluminium memiliki konduktivitas listrik dan panas yang baik, dan dengan menambahkan paduan, dapat diubah menjadi resistor listrik. Oleh karena itu, aluminium merupakan salah satu jenis logam yang sangat versatil dan memiliki banyak fungsi (ASM International, 1990). Sifat mekanik dari aluminium dapat dilihat pada Tabel 2.1.

**Tabel 2. 1** Sifat mekanik dan fisik dari alumium murni (Ay et al., 2000).

Sifat	Satuan	Nilai
Densitas	$\text{g/cm}^3$	2,70
Resistansi	$(\Omega\text{mm}^2/\text{m}) \cdot 10^2$	2,66
Konduktivitas Termal	$\text{cal/cm}^2/\text{cm}^\circ\text{Cs}$	0,52
<i>Thermal coefficient of linear expansion</i>	$(\text{mm/mm}^\circ\text{C}) \cdot 10^{-6}$	24,00
Temperatur leleh	$^\circ\text{C}$	660,00
Kekuatan tarik	$\text{N/mm}^2$	91,50
Elongasi	%	30,10
Kekerasan	HV	57,98

#### 2.1.1 Paduan Al-Mg-Si

Dalam paduan aluminium, terdapat beberapa kategori, dimana tiap kategori menunjukkan paduan aluminium dengan komposisi yang berbeda, dimana 1xxx merupakan kategori aluminium murni, 2xxx merupakan paduan dengan Cu sebagai paduan utama, 3xxx dengan Mn sebagai paduan utama, 4xxx dengan Si dengan paduan utama, 5xxx dengan Mg sebagai paduan utama, 6xxx dengan Mg dan Si sebagai paduan utama, 7xxx dengan Zn sebagai paduan utama, 8xxx dengan komposisi lainnya, dan 9xxx direservasi untuk keperluan di masa depan (Davis, 2001).

**Tabel 2. 2** Elemen paduan dari Aluminium 6061 (ASM International, 1990).

Elemen	wt%
Si	0,40 – 0,80
Fe	0,7
Cu	0,15 – 0,40
Mn	0,15
Mg	0,80 – 1,20
Cr	0,04 – 0,35
Zn	0,25
Ti	0,15
Unspecified other elements	0,15% (total)
Al	sisia

Dalam penelitian ini, digunakan paduan aluminium dengan komposisi paduan dominan magnesium dan silikon. Paduan ini merupakan bagian dari seri 6xxx. Aluminium dari seri ini

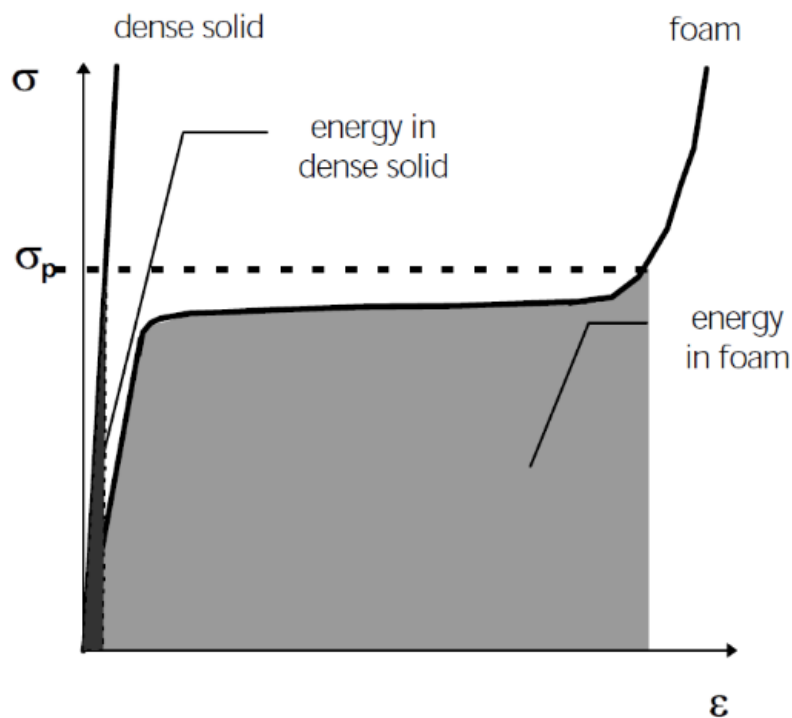
memiliki harga yang murah, selalu tersedia, dan tahan lama dengan sifat mekanik yang bagus. Salah satu paduan dari seri tersebut adalah aluminium 6061, dengan komposisi seperti di Tabel 2.2 (ASM International, 1990) (Leon & Jayakumar, 2015).

## 2.2 Aluminium Foam

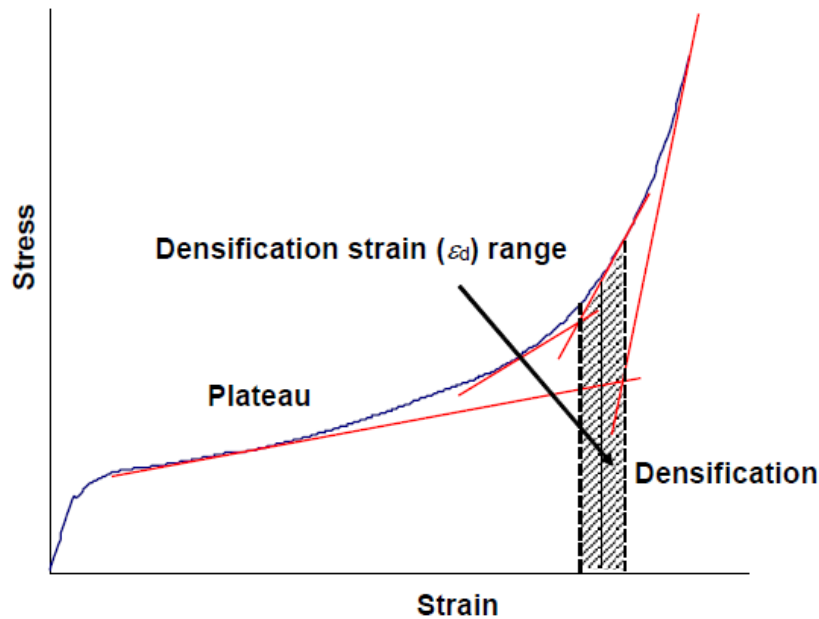
*Sponge Metal*, atau *Metal Foam* pertama kali dipatenkan oleh Benjamin Sosnick sebagai definisi dari produk metal dengan bentuk apapun yang memiliki lubang kecil (porositas) yang banyak, membuat logam menyerupai sebuah foam (Sosnick, 1948). *Metal foam* dapat dibagi menjadi dua kategori besar, yaitu *closed-cell foam*, yang memiliki pori tertutup, dan *open-cell foam*, yang memiliki porositas yang saling berhubungan (Curran, 2003). Dalam penelitian ini, dilakukan manufaktur *metal foam* menggunakan logam dasar aluminium.

### 2.2.1 Karakteristik dan Sifat Mekanik Aluminium Foam

Dibandingkan dengan paduan aluminium biasa, *aluminium foam* memiliki kekuatan kompresi serta penyerapan energi yang baik pada densitas yang lebih rendah. Sifat penyerapan energi yang bagus tersebut datang dari daerah *plateau* pada kurva tegangan dan regangan. Daerah tersebut merupakan daerah dimana terjadi pertambahan regangan dengan tingkat stress yang cenderung konstan. Kapabilitas inilah yang membuat *aluminium foam* memiliki penyerapan energi yang bagus, seperti yang ditunjukkan di Gambar 2.1 (Yu & Banhart, 1998). Area absorpsi energi dihitung dari *strain* 0% hingga pada *strain* densifikasi yang ditentukan dengan metode interseksi tangen seperti pada Gambar 2.2 (Paul & Ramamurty, 2000).

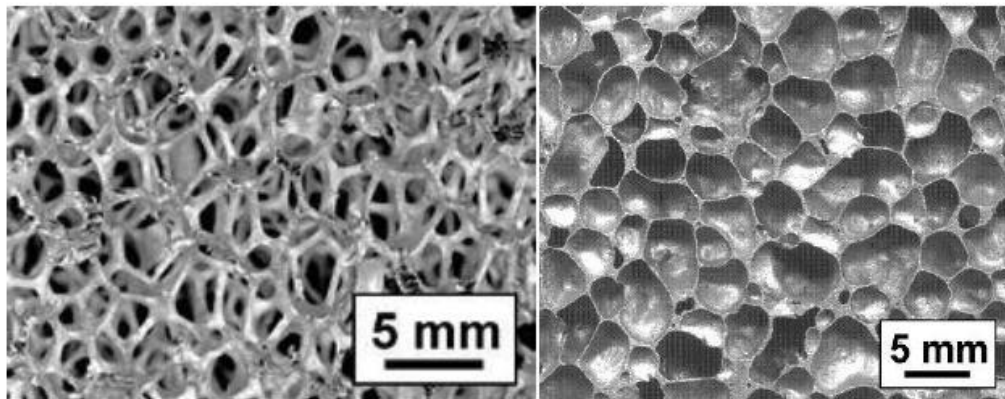


**Gambar 2. 1** Perbandingan penyerapan energi *foam* logam dan logam padat (Yu & Banhart, 1998).



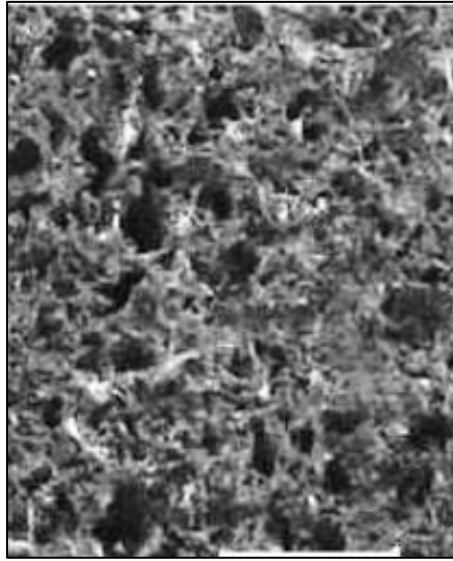
**Gambar 2. 2** Metode menentukan *strain* densifikasi (Basit & Cheon, 2019).

Dalam *aluminium foam*, terdapat beberapa faktor yang mengubah karakteristik dan sifat mekanik dari *aluminium foam*. Salah satu faktor tersebut adalah struktur pori, dimana terdapat foam dengan bentuk pori terbuka (*open-cell*) dan tertutup (*closed-cell*) (Nasrabadi et al., 2016), seperti di Gambar 2.3.



**Gambar 2. 3** *Aluminium foam open cell* dan *closed cell* (Sathurusinghe et al., 2012).

*Open-cell aluminium foam* memiliki struktur dengan luas permukaan yang besar, dengan konduktivitas listrik dan termal yang tinggi. (Curran, 2003) *Aluminium foam open-cell* memiliki fungsi sebagai peredam suara, disipasi termal, dan filtrasi temperatur tinggi. Hal ini disebabkan oleh permeabilitas dan pori terbukanya (Wan et al., 2021). Sebaliknya, sifat tertutup dari *closed-cell aluminium foam* menghasilkan material yang lebih kuat, mampu menahan beban dan menyerap energi yang lebih tinggi dari *foam* pori terbuka (Wan et al., 2021). Selain itu, terdapat juga sifat kekakuan yang tinggi, peredam getaran, peredam suara, dan ketahanan panas. Hal ini menyebabkan *foam* jenis ini cocok sebagai material utama untuk *ballistic armor*, *sandwich panels*, *energy absorption device*, dll (Idris et al., 2009).



**Gambar 2. 4** Hasil uji optik dari struktur *aluminium foam* (Ghaleh et al., 2021).

Sifat mekanik dan fisik dalam *aluminium foam* ditentukan oleh hal-hal seperti densitas, ukuran sel, homogenitas sel, dan porositas (Heidari Ghaleh et al., 2021) (Mirzaei-Solhi et al., 2018). Menurut Mirzaei-Solhi dkk., persentase porositas menghasilkan bentuk sel yang berbeda. Porositas >80% menghasilkan sel polihedral, 70 – 80% sel semi-*spherical*, dan di bawah itu berbentuk bulat (Mirzaei-Solhi et al., 2018). Dari Gambar 2.4, dapat dilihat hasil pengamatan menggunakan mikroskop optik. Daerah yang gelap merupakan lubang atau pori dari material, dan daerah yang terang menunjukkan dinding sel (Ghaleh et al., 2021). Perhitungan porositas dapat dilakukan dengan cara mencari densitas dari *aluminium foam*. Pertama, dilakukan penimbangan untuk menentukan massa dari foam. Lalu volume ditentukan dengan cara mengukur perubahan volume air sebelum dan setelah dimasukkan spesimen. Dari kedua hasil tersebut, dapat dicari densitas *foam* ( $\rho_f$ ) dengan cara membagi massa dengan volume seperti pada Persamaan 2.1 (Nawaz & Rani, 2021).

$$\rho_f = \frac{\text{mass}}{\text{volume}} \quad (2.1)$$

Untuk mencari porositas, diperlukan konversi dari densitas menuju densitas relatif, yang dapat dihitung dengan cara membagi densitas foam terhadap densitas aluminium. Lalu dari densitas relatif ( $\rho_r$ ), dapat ditentukan porositas seperti Persamaan 2.2 dan Persamaan 2.3 (Sutarno et al., 2015).

$$\rho_r = \frac{\text{foam density } (\rho_f)}{\text{aluminium density } (\rho_o)} \quad (2.2)$$

$$\% \text{ porosity} = (1 - \rho_r) \times 100\% \quad (2.3)$$

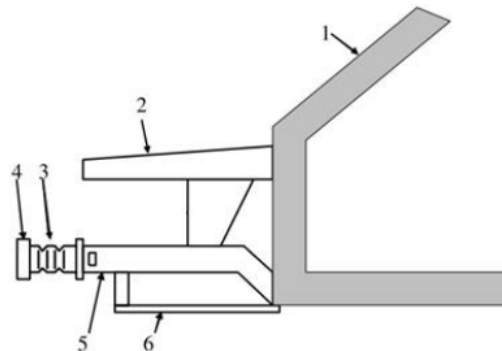
### 2.2.2 Aplikasi Aluminium Foam

*Aluminium foam* merupakan material yang memiliki massa yang ringan, kekuatan kompresif, dan penyerapan energi yang tinggi. Oleh karena itu, *aluminium foam* cocok digunakan untuk menahan deformasi plastis yang besar (Yu & Banhart, 1998) (Heidari Ghaleh et al., 2021).

Salah satu aplikasi dari *aluminium foam* adalah sebagai material *crash box*. *Crash box* merupakan bagian dari kendaraan bermotor (Gambar 2.5, Gambar 2.6, dan Gambar 2.7) yang didesain untuk menyerap energi saat terjadi tabrakan, meminimalisir kerusakan di bagian lain

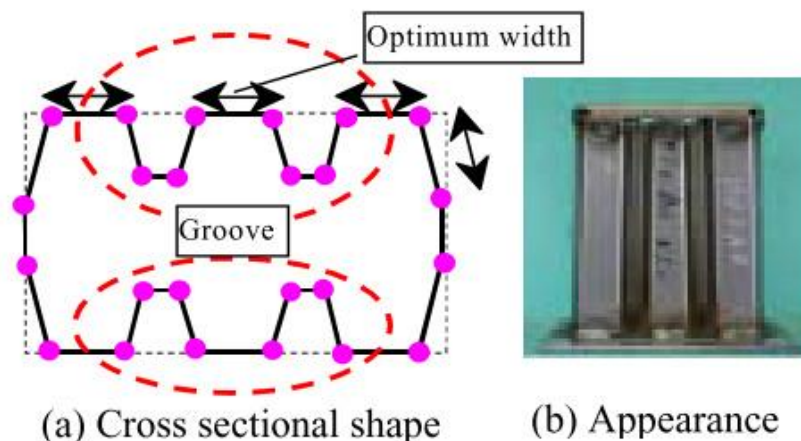


dan mengurangi beban tabrakan (Yusof et al., 2017). Untuk mencapai tujuan tersebut, *crash box* harus memiliki kemampuan untuk hancur terlebih dahulu sebelum bagian lain untuk menyerap energi (Nakazawa et al., 2005).

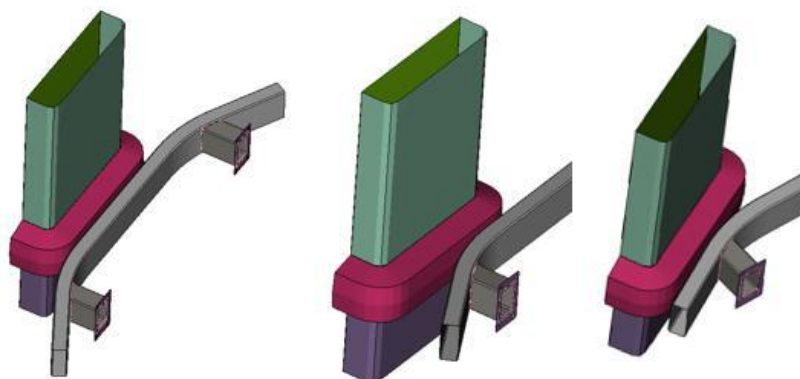


(1) Undeformable cockpit, (2) upper front rails, (3) crash box, (4) bumper cross member, (5) main front rails, (6) mechanics frame.

**Gambar 2. 5** Lokasi *crash box* pada struktur depan mobil (Morello et al., 2010).



**Gambar 2. 6** Bentuk optimal dari *crash box* (Nakazawa et al., 2005).



**Gambar 2. 7** Bumper yang sedang diuji (Constantin et al., 2016).

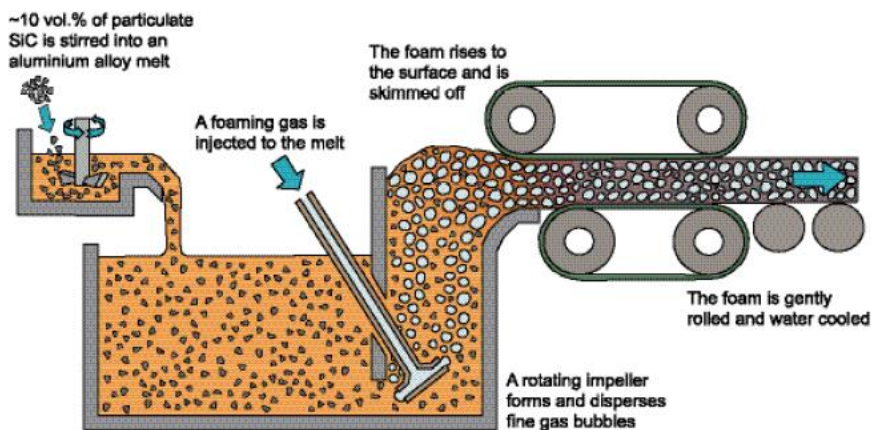
Pada umumnya, material yang digunakan sebagai *crash box* adalah aluminium hampa. Aluminium hampa digunakan karena memenuhi syarat *crash box* yang di sebutkan sebelumnya. Adisi *aluminium foam* pada *crash box* sebagai *filler* dapat menambahkan kekuatan serta penyerapan energi tanpa menambah berat berlebih (Yusof et al., 2017); (Renreng et al., 2020).

### 2.3 Metode Produksi Aluminium Foam

Pembuatan *aluminium foam* dapat dilakukan dengan dua metode – metalurgi serbuk dan pengecoran. Metalurgi serbuk dilakukan menggunakan serbuk aluminium yang dikompaksi bersama *foaming agent*, sementara pengecoran dilakukan menggunakan pelelehan aluminium dan penambahan gelembung dalam lelehan (Kammer, 1999).

Pengecoran merupakan proses manufaktur dimana logam cair pada umumnya dituangkan pada cetakan, dan dibiarkan hingga mendingin (DeGarmo et al., 2003). Secara umum, proses pengecoran dapat dibagi menjadi dua, yaitu *expendable mold process* dan *non-expendable mold process*. *Expendable mold process* merupakan proses pengecoran yang menggunakan cetakan sementara yang tidak dapat digunakan berulang kali. Contoh proses pengecoran dalam kategori ini adalah *sand-casting*, *plaster mold casting*, serta *investment casting*. Sementara *non-expendable mold process* merupakan proses pengecoran dimana cetakan yang digunakan bersifat permanen dan dapat digunakan berulang kali. Contohnya adalah *die casting*, *permanent mold casting*, dan *centrifugal casting* (Boljanovic, 2010).

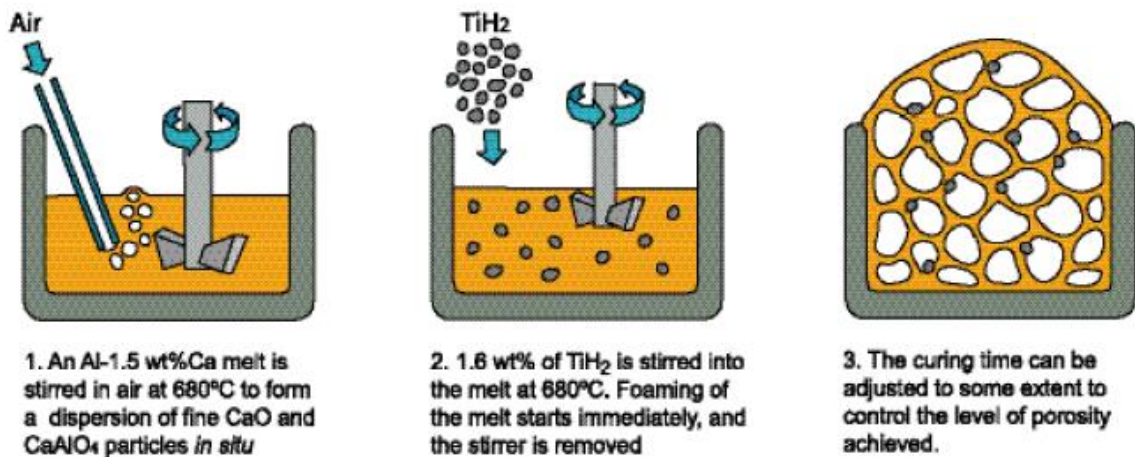
Pada proses pembuatan *foam*, dapat dilakukan beberapa metode, yaitu dengan cara injeksi secara langsung (*gas injection*) pada Gambar 2.8, serta dengan penambahan *foaming agent* pada Gambar 2.9 (Curran, 2003).



**Gambar 2. 8** Proses produksi foam logam menggunakan metode injeksi gas (Curran, 2003).

Metode injeksi gas merupakan metode yang paling sederhana, dimana gelembung terbentuk dari gas yang diinjeksi langsung ke bagian bawah lelehan seperti pada Gambar 2.8. Gelembung ini akan naik ke atas untuk membentuk pori berbentuk *closed-cell*. *Foam* yang dibuat menggunakan metode ini tidak stabil karena kecenderungan gelembung untuk naik ke atas. Hal ini dapat diatasi dengan penambahan *stabilizer* untuk meningkatkan viskositasnya, namun penambahan yang terlalu berlebih dapat menghambat pembentukan foam, karena metode ini mengandalkan viskositas yang rendah agar gas dapat tersebar dengan baik. Hal ini disebabkan pengadukan dapat merusak gelembung yang sudah terbentuk (Iljoon Jin, Kingston; Lorne D. Kenny, 1990).

Metode lainnya adalah dengan penambahan *foaming agent* seperti pada Gambar 2.9. Metode ini dilakukan dengan cara melelehkan logam dan mengaduknya. Setelah logam sepenuhnya meleleh, *foaming agent* dimasukkan ke dalam lelehan. Untuk memastikan *foaming agent* tersebar merata, proses pengecoran dilakukan menggunakan cara *stir casting*, metode pengecoran yang digunakan untuk menyebarkan zat penguat dalam lelehan. Kemudian, lelehan ditahan pada temperatur tertentu agar *foaming agent* dapat terdekomposisi. Dari hasil dekomposisi tersebut, akan terjadi reaksi yang menghasilkan gas di dalam lelehan (Curran, 2003) (Annigeri & Veeresh Kumar, 2017).



**Gambar 2. 9** Proses produksi foam logam dengan metode penambahan *foaming agent* (Curran, 2003).

#### 2.4 *Foaming Agent* CaCO<sub>3</sub>

*Foaming agent* merupakan zat pengembang yang disebarkan dalam lelehan logam dengan cara diaduk agar terbentuknya foam logam. *Foaming agent* merupakan alternatif dari metode injeksi gas, dimana penggunaan *foaming agent* memberikan dekomposisi kimia yang gradual dan pengembangan foam yang progresif. Hal ini memberikan ruang agar gelembung memiliki waktu untuk menyusun diri agar sel yang terbentuk bersifat homogen dan stabilisasi pori (Curran, 2003).

TiH<sub>2</sub> merupakan salah satu *foaming agent* yang paling umum digunakan. Namun, seiring berkembangnya penelitian di bidang ini, peneliti mulai mencari alternatif lain dari TiH<sub>2</sub>. Salah satu alternatif yang ditemukan adalah CaCO<sub>3</sub> atau kalsium karbonat, senyawa yang pada umumnya ditemukan pada bebatuan seperti *limestone* (Tegethoff, 2001). Senyawa ini cocok digunakan sebagai alternatif karena CaCO<sub>3</sub> merupakan zat yang jauh lebih murah dibandingkan dengan TiH<sub>2</sub>, densitas yang lebih mendekati aluminium (2,71 – 2,83 g/cm<sup>3</sup>), dan temperatur dekomposisi yang lebih tinggi dari temperatur leleh aluminium (Kevorkijan, 2010).

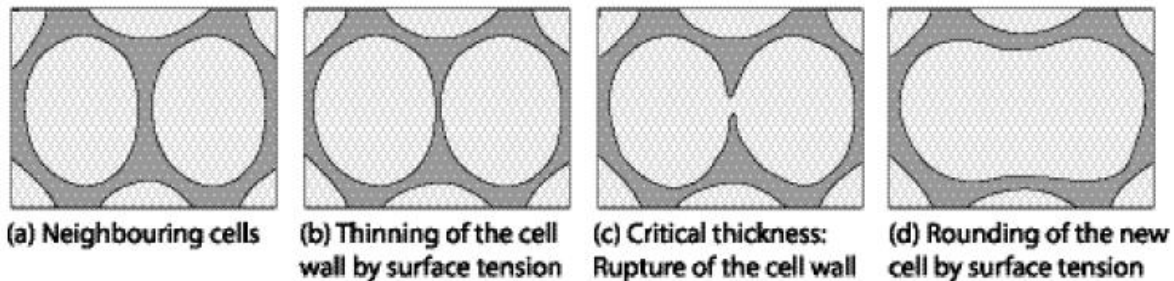
Pada proses peleburan aluminium, reaksi antara aluminium dan udara dapat terbentuk dan CaCO<sub>3</sub> berdekomposisi. dari kedua reaksi tersebut, akan terbentuk CaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> atau CaOAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang memiliki peran penting dalam stabilisasi pori yang terbentuk oleh CO<sub>2</sub> dalam proses solidifikasi (Sutarno et al., 2017). Reaksi dapat dilihat di persamaan 2.4, persamaan 2.5, dan persamaan 2.6.



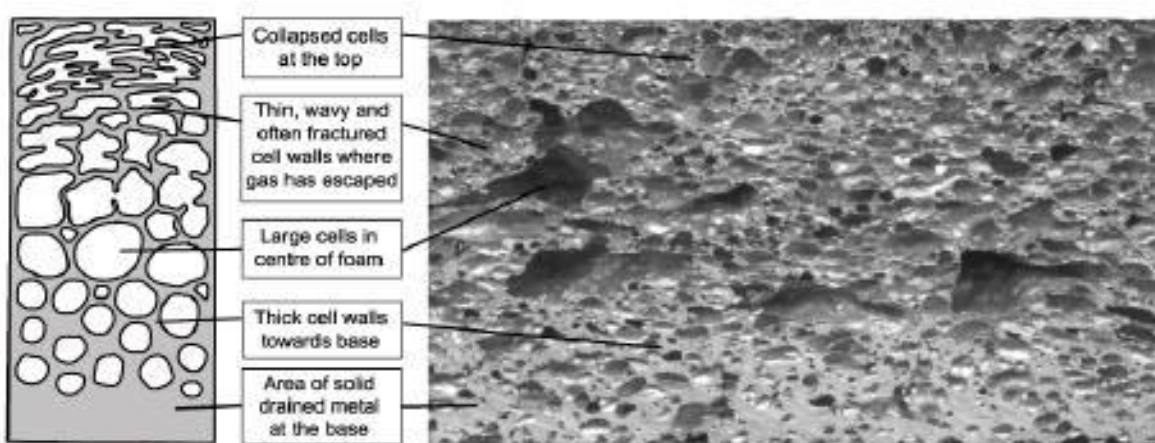
Proses dekomposisi CaCO<sub>3</sub> terjadi pada temperatur tertentu, yang diketahui melalui pengujian DTA (*Differential Thermal Analysis*) dan TGA (*Thermogravimetric Analysis*). Dari beberapa jurnal, disebutkan bahwa temperatur dekomposisi CaCO<sub>3</sub> berlangsung pada temperatur 650 – 930°C (A. Osman et al., 2017); (Aboraia et al., 2011); (Karunadasa et al., 2019).

## 2.5 Stabilizer $Al_2O_3$

Dalam pembuatan *aluminium foam*, digunakan sebuah *stabilizer* atau *thickening agent* dalam prosesnya.  $Al_2O_3$ , atau aluminium oksida merupakan salah satu *stabilizer* yang umum digunakan pada proses pembuatan *aluminium foam* (Ghaleh et al., 2021).



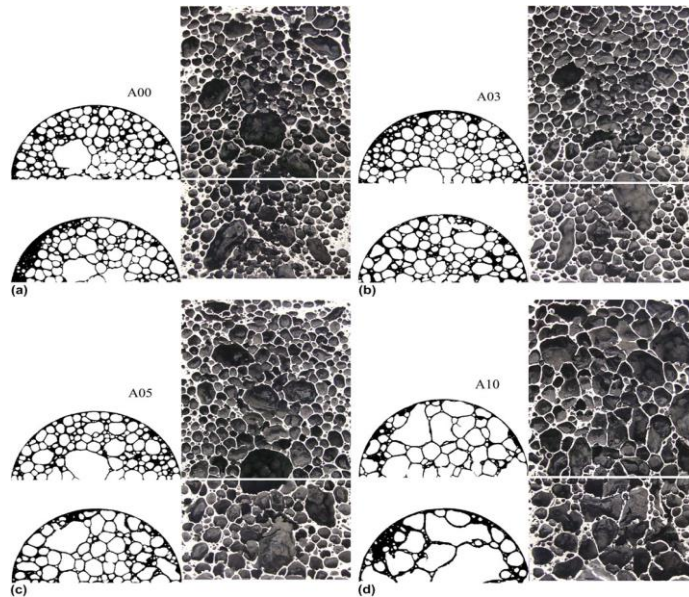
**Gambar 2. 10** Kerusakan pada sel *aluminium foam* (Curran, 2003).



**Gambar 2. 11** Drainase pada *aluminium foam* (Curran, 2003).

Drainase merupakan penyebab paling umum kerusakan *aluminium foam*, dimana logam cair turun ke bawah akibat bentuk sel tidak homogenous dan tidak stabil. Hal ini ditunjukkan dengan sel yang rusak di bagian atas, sel besar di bagian tengah, serta aluminium padat yang mengumpul di bagian bawah, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10 dan Gambar 2.11 (Curran, 2003).

Penambahan *stabilizer* dapat mengatasi masalah ini dengan meningkatkan viskositas atau keenceran dari lelehan *aluminium foam*. Dalam viskositas rendah, gas akan mudah keluar dari lelehan, mengurangi porositas. Namun sebaliknya, viskositas yang terlalu tinggi juga dapat merusak foam. Hal ini disebabkan lelehan yang terlalu kental dapat menekan pertumbuhan gas dari *foaming agent* (Song et al., 2000). Dari penelitian Mamhmutyazicioglu, ditemukan bahwa penambahan  $Al_2O_3$  meningkatkan homogenitas dalam struktur sel. Namun ketika mencapai penambahan terlalu banyak, sel justru rusak dan menyatu, membentuk sel yang sangat besar dan mengurangi porositas, serta dinding sel yang tipis dan bagian awah *foam* yang sangat padat. Hal ini menunjukkan bahwa terjadinya drainase, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12 (Mahmutyazicioglu et al., 2013).

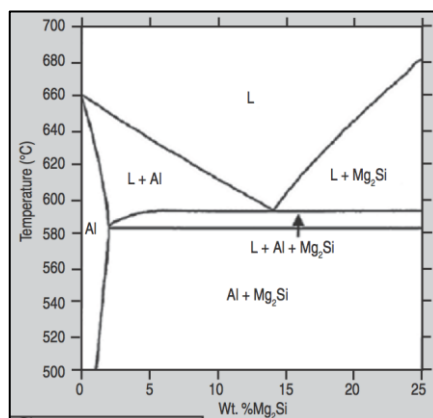


**Gambar 2. 12** Pengaruh penambahan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0% – 10%) pada struktur sel dan densitas (Mahmutyazicioglu et al., 2013).

## 2.6 *Precipitation Hardening*

*Precipitation hardening* atau *age hardening* merupakan proses perlakuan panas yang umum dilakukan pada paduan aluminium. Proses ini bertujuan untuk meningkatkan sifat mekanik dari aluminium, hal ini disebabkan oleh timbulnya partikel nano magnesium silisida atau  $\text{Mg}_2\text{Si}$  yang tersebar pada matriks yang disebut presipitat. Presipitat tersebut dapat menghambat pergerakan dislokasi matriks aluminium (ASM International, 1991).

Proses *precipitation hardening* meliputi dua tahap, yaitu tahap *solution treatment* serta tahap *artificial aging*. *Solution treatment* merupakan proses dimana material dipanaskan hingga di atas temperatur kritisnya. Pada paduan aluminium, temperatur ini berkisar pada 500 – 595°C, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13. Dilakukan *holding* atau penahanan pada temperatur tersebut agar terbentuknya larutan padat yang memiliki fasa homogen di bawah solidus (Kumar et al., 2019), (ASM International, 1991).

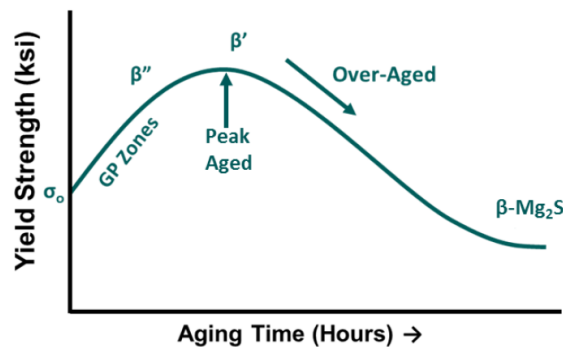


**Gambar 2. 13** Diagram fasa Al- $\text{Mg}_2\text{Si}$  (Donovan et al., 2015).

Setelah dilakukan proses *solution treatment*, material akan didinginkan secara cepat dari temperatur perlakuan panas hingga temperatur ruangan dalam proses yang dinamakan *quenching*. Tujuan dilakukannya proses ini adalah agar larutan padat homogen yang sudah terbentuk pada proses *solution treatment* dan kekosongan atom dalam keseimbangan termal pada temperatur tinggi tetap pada tempatnya. Hasil dari proses ini adalah *Super Saturated Solid*

*Solution*, atau larutan padat lewat jenuh, yang merupakan fasa tidak stabil pada temperatur ruang (Abdillah, 2010).

Setelah *quenching* dilakukan, material akan dipanaskan kembali dalam proses *aging*, yang dilakukan untuk memperoleh presipitat sekaligus meningkatkan kekuatan dan kekerasan (ASM International, 1991). Proses ini biasanya dilakukan dalam temperatur ruang, yang bisa berlangsung dari 5 hari hingga berminggu-minggu. Untuk mempercepat proses tersebut, dapat dilakukan proses *aging* dalam temperatur yang lebih tinggi, umumnya pada 100 – 200°C dengan durasi 1 – 48 jam. Proses ini dinamakan *artificial aging* (Abdillah, 2010). Dalam proses ini, awalnya terbentuk kluster atom Si dan Mg, dilanjutkan ke zona Guinier-Preston, *Intermediate precipitate β''*, *Intermediate precipitate β'*, dan fasa ekuilibrium β-Mg<sub>2</sub>Si, dengan urutan dari endapan kecil hingga besar. Semakin kecil ukuran endapan/presipitat, akan semakin koheren. Proses aging bertujuan untuk membesarkan endapan ini agar terbentuk presipitat yang inkoheren dan dapat menghalangi dislokasi, yang harus bergerak melewati presipitat. Namun, endapan yang terlalu besar dan inkoheren dapat menurunkan kekuatan juga, dikarenakan jumlah presipitat yang menurun, seperti pada Gambar 2.14 (Donovan et al., 2015).



**Gambar 2. 14** Pengaruh durasi *aging* pada presipitat yang terbentuk dan kekuatannya (Donovan et al., 2015).

## 2.7 Penelitian Sebelumnya

Sebelum penelitian ini dilakukan, terdapat beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya dengan topik yang serupa. Beberapa penelitian tersebut adalah:

**Tabel 2. 3** Penelitian yang telah dilakukan sebelumnya.

Penulis	Judul Penelitian	Hasil
Sanjaya (2022)	Analisis Pengaruh <i>Heat Treatment</i> Terhadap Karakteristik Dan Sifat Mekanik <i>Aluminium Foam</i> Dengan Menggunakan <i>Stabilizer Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i> Dan <i>Foaming Agent CaCO<sub>3</sub></i>	Perlakuan panas pada <i>aluminium foam</i> tidak mempengaruhi sifat fisiknya, namun sifat mekanik tetap terpengaruh. Dari variasi perlakuan panas <i>solution treatment + artificial aging</i> , <i>artificial aging</i> , <i>annealing</i> , dan <i>no treatment</i> , didapatkan hasil terbaik pada <i>solution treatment + artificial aging</i> dengan kekuatan impak 11,61 J, kekuatan kompresi 118,7 MPa, dan strain

Penulis	Judul Penelitian	Hasil
		sebesar 71,56% (Sanjaya, 2022).
Ardiansyah (2021)	Pengaruh Variasi Stabilizer $Al_2O_3$ Terhadap Karakteristik dan Sifat Mekanik Aluminium Foam dan Foaming Agent $CaCO_3$	Aluminium foam dengan penambahan $Al_2O_3$ sebanyak 5% menghasilkan sifat mekanik yang paling optimum dengan kekuatan kompresi sebesar 19.750 Mpa dan penyerapan energi 16.005 J (Ardiansyah, 2021).
Sinaga (2021)	Karakterisasi Porositas dan Sifat Mekanik Aluminium Foams dengan Variasi Holding Temperatur Menggunakan Stabilizer $Al_2O_3$ dan Foaming Agent $CaCO_3$	Pada temperatur 780° C merupakan temperatur yang optimum karena memiliki ukuran porositas sebesar 0.067208 mm dan memiliki nilai densitas sebesar 0.895 g/cm <sup>3</sup> (Sinaga, n.d.).
Riyanto (2021)	Pengaruh Penambahan Foaming Agernt $CaCO_3$ Terhadap Pembentukan dan Karakteristik dari Aluminium Foam	Aluminium foam yang telah terbuat dengan foaming agent $CaCO_3$ Hasil optimal didapatkan pada $CaCO_3$ 7 wt% dengan memberikan nilai penyerapan energi yang paling tinggi yaitu sebesar 7.1567 J dan nilai kekuatan kompresi paling tinggi yaitu sebesar 0.765 MPa (Riyanto, n.d.).
An (2021)	Effect of $CaCO_3$ Content Change on the Production of Closed-Cell Aluminium Foam by Selective Laser Melting	Naiknya laju pemanasan dapat mengubah laju dekomposisi $CaCO_3$ . Penambahan jumlah $CaCO_3$ mempengaruhi porositas, dimana 5-10% porositas naik secara drastis, namun 10-15% tidak menunjukkan perubahan yang signifikan. Naiknya kadar $CaCO_3$ juga memperbesar ukuran sel, dan fenomena kerusakan sel juga semakin rentan terjadi (An et al., 2021).
Ghaleh (2021)	High Porosity Closed-Cell Aluminium Foams Produced by Melting Method Without Stabilizer Particles	Aluminium foam dibuat tanpa menggunakan partikel stabilizer. Hasil yang optimal didapatkan pada 3% $CaCO_3$

Penulis	Judul Penelitian	Hasil
		dengan <i>mixing time</i> selama 4 menit dan <i>holding time</i> 10 menit. Ukuran sel dan porositas bertambah dan densitas foam berkurang dengan bertambahnya <i>holding time</i> dan jumlah $\text{CaCO}_3$ (Ghaleh et al., 2021).
Hussein (2020)	<i>Effect of Heat Treatment on Mechanical and Vibration Properties for 6061 and 2024 Aluminium Alloys</i>	Perlakuan panas dilakukan pada aluminium 6061 dan 2024. Dari penelitian yang dilakukan, ditemukan perlakuan panas yang terbaik adalah pada $530^\circ\text{C}$ selama 60 menit dengan <i>water quenching</i> dan aging pada $175^\circ\text{C}$ selama 3 jam. Perlakuan panas ini meningkatkan kekuatan dan kekerasan (Hussein et al., 2020).
Rajak (2018)	<i>Fabrication and Investigation of Influence of <math>\text{CaCO}_3</math> as Foaming Agent on Al-SiCp Foam</i>	Paduan aluminium A360 diberikan berbagai kombinasi komposisi SiC dan $\text{CaCO}_3$ . Hasil terbaik ditemukan pada penambahan SiC 15% dan $\text{CaCO}_3$ 3%, dengan absorpsi energi terbesar (Rajak et al., 2019).
Nazim (2013)	<i>Effects of Alumina (<math>\text{Al}_2\text{O}_3</math>) Addition on the Cell Structure and Mechanical Properties of 6061 Foams</i>	Alumina mempengaruhi makrostruktur dari foam. 3% dan 5% mengurangi drainase. 10% ditemukan sebagai jumlah penambahan yang terlalu banyak karena ditunjukkan drainase meningkat akibat distribusi sel yang tidak homogen (Mahmutyazicioglu et al., 2013).
Lehmhus (2003)	<i>Properties of Heat-treated Aluminium Foam</i>	<i>Aluminium foam</i> dengan material dasar Paduan Al 6061 diberikan berbagai jenis perlakuan panas. Metode pembuatan adalah metalurgi serbuk dan <i>foaming agent</i> yang digunakan adalah $\text{TiH}_2$ .



---

---

Penulis	Judul Penelitian	Hasil
		Hasil terbaik ditemukan pada <i>solution treatment</i> 530° C selama 100 menit dengan <i>aging</i> 165 ° C selama 10 jam (Lehmhus & Banhart, 2003).

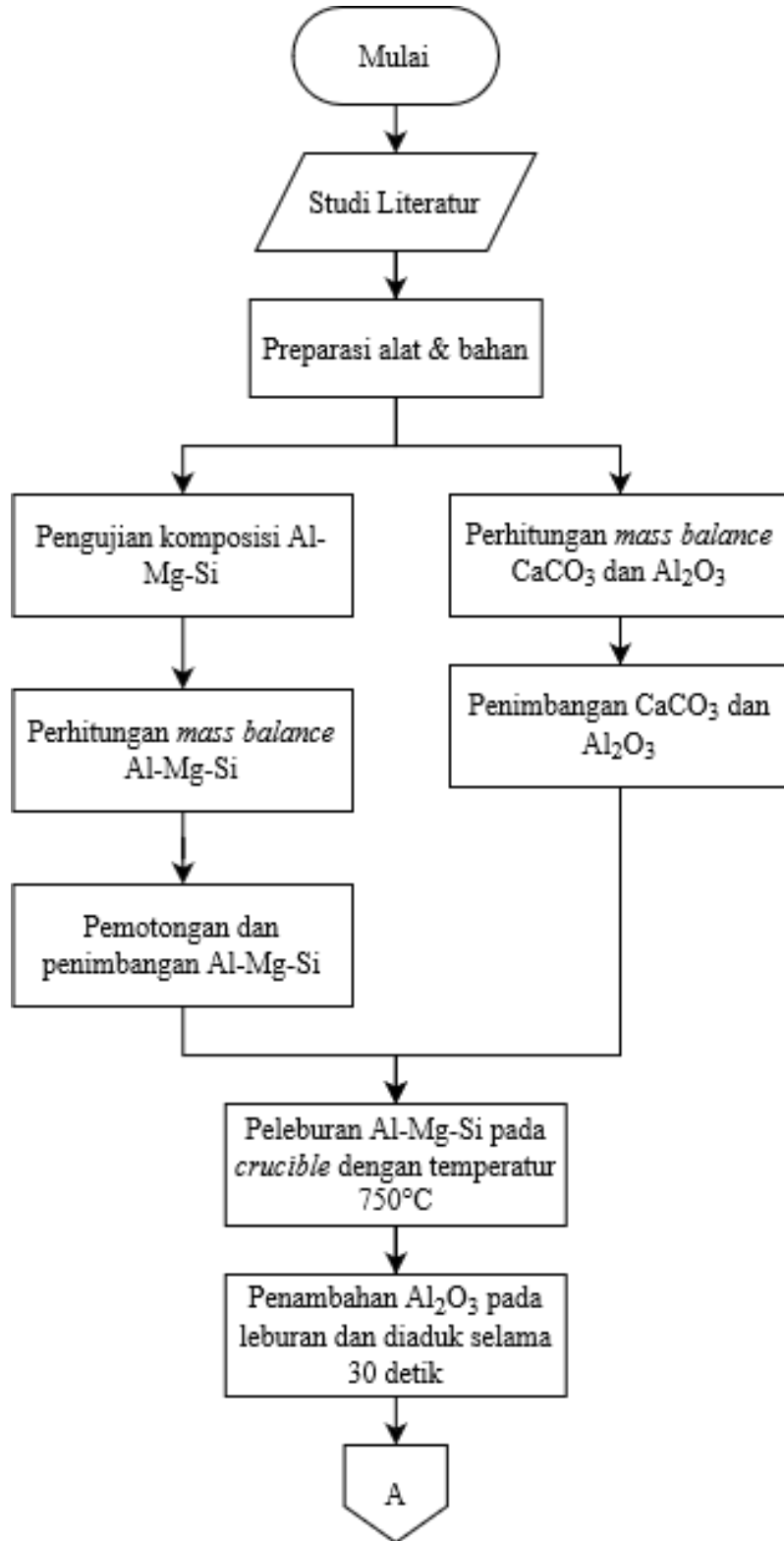
---

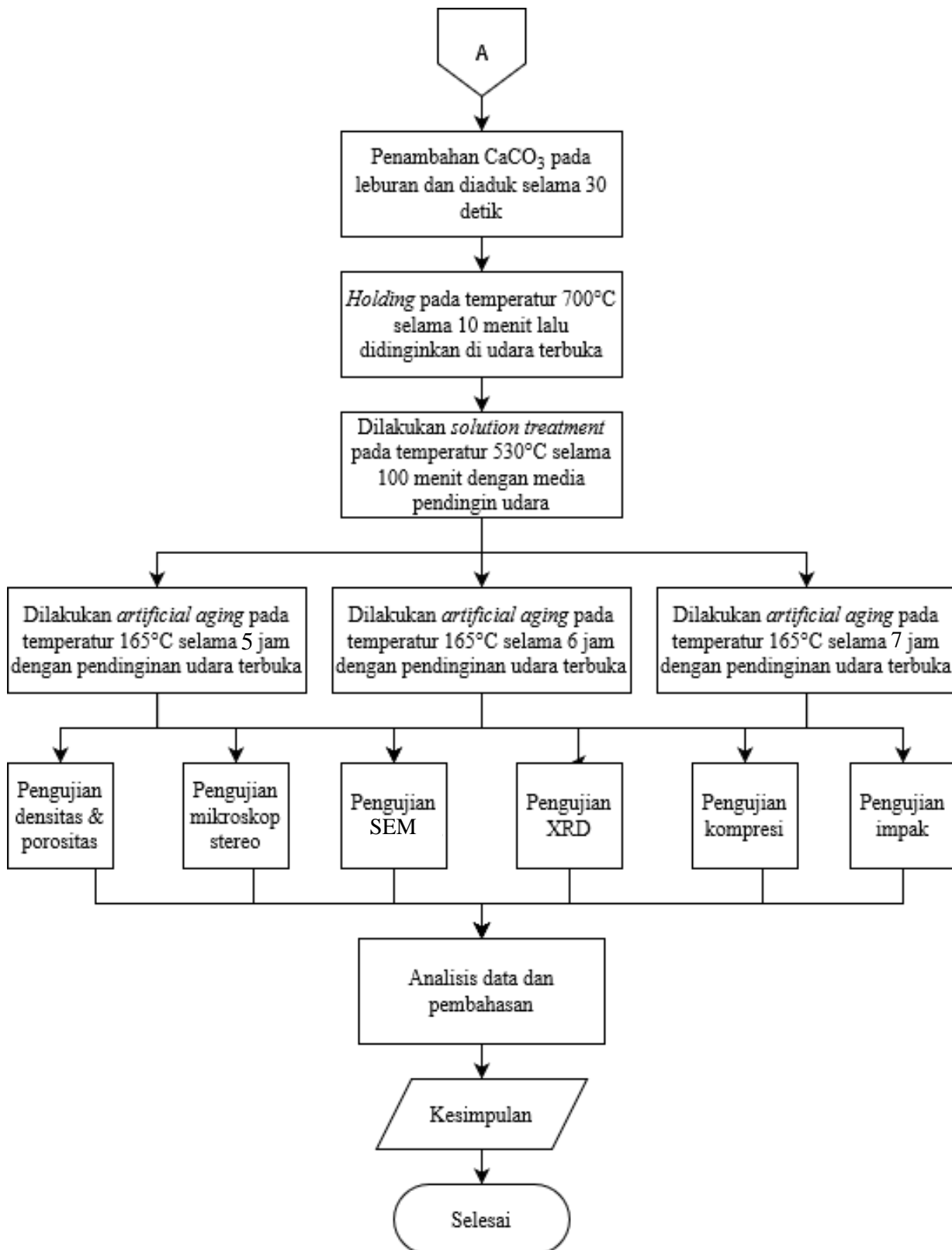
---

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Diagram Alir





Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

### 3.2 Bahan Penelitian

Berikut adalah bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini :

1. Aluminium 6061

Aluminium 6061 *ingot* digunakan sebagai bahan baku pengecoran yang diperoleh dari PT Cahaya Stainless yang merupakan distributor dari PT Vimetco Airo di Rusia dengan komposisi aluminium >99%.

2. CaCO<sub>3</sub> Powder

CaCO<sub>3</sub> Powder yang digunakan ber merk Sigma-Aldrich yang berasal dari Kanada dalam bentuk *fine powder* dengan kadar 99%. Dibeli di *platform online shop* dari Jakarta bernama Chemicalindo.

3. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Powder

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dalam bentuk *fine powder* dengan merk jual Loba Chemie yang berasal dari India dengan kemurnian 99%. Dibeli di *platform online shop* dari Jakarta bernama Chemicalindo.

### 3.3 Alat Penelitian

Dalam penelitian ini, alat-alat yang digunakan di antara lain adalah timbangan digital untuk mengukur *mass balance* antara Al-Mg-Si, CaCO<sub>3</sub>, dan juga Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.; gergaji mesin untuk memotong Al; *crucible* untuk tempat meleburkan Al; *burner* untuk meleburkan Al; bor dan alat pengaduk untuk mengaduk Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> serta CaCO<sub>3</sub>; pencapit untuk mengangkat *crucible* dari *burner*; kompresor udara untuk proses *air quenching*; gelas ukur untuk menghitung volume; kikir untuk meratakan spesimen; serta amplas dan *metal polish* untuk pengujian SEM-EDX.

### 3.4 Instrumen Pengujian

Dalam penelitian ini, digunakan beberapa instrumen untuk pengambilan data untuk dianalisis. Instrumen yang digunakan antara lain adalah:

a. *Spark Optical Emission Spectrometry*

Digunakan untuk mengetahui komposisi dari material dasar penelitian.

b. Mesin SEM-EDX

Digunakan untuk mengamati mikrostruktur dari spesimen serta menganalisis komposisi yang terdeteksi pada mikrostruktur tersebut.

c. Mikroskop Stereo

Digunakan untuk mengamati makrostruktur dari spesimen.

d. *X-ray Diffraction (XRD)*

Digunakan untuk mengetahui karakteristik unsur-unsur yang ada pada spesimen.

e. Alat Uji Kompresi

Digunakan untuk mengetahui kekuatan tekan dari spesimen, menghasilkan diagram *force vs. displacement*.

f. Alat Uji Impak

Digunakan untuk mengetahui kekuatan impak dari spesimen.

### 3.5 Metode Penelitian

Variabel yang digunakan pada penelitian tentang *aluminium foam* ini adalah variasi *holding time* pada *artificial aging*.

#### 3.5.1 Prosedur Proses Pengecoran

Proses pengecoran *aluminium foam* dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

1. Melakukan preparasi bahan aluminium 6061 dan serbuk CaCO<sub>3</sub>.

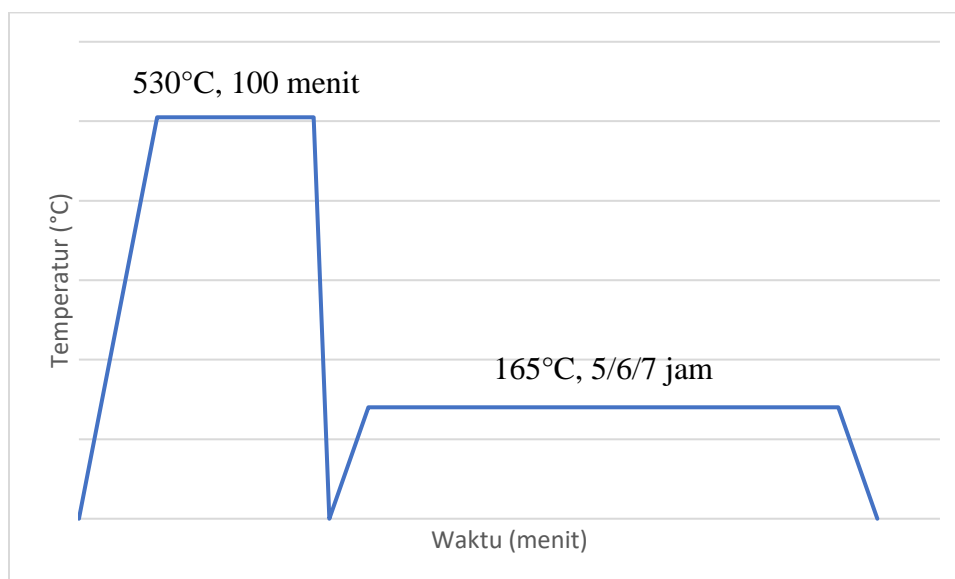
2. Memotong aluminium 6061 dan menimbang material *foaming agent* dan *stabilizer* sesuai dengan variasi persentase massa yang dilakukan.

3. Melakukan *preheat* pada *crucible* A5 sampai temperatur 750°C. Kemudian dilakukan *holding* selama 6 jam. Selanjutnya diturunkan ke 600°C untuk mencegah terjadinya *thermal-shock*.
4. Setelah itu dimasukkan aluminium *ingot* ke dalam *crucible* dan dinaikkan temperatur hingga 750°C agar aluminium melebur.
5. Setelah terbentuk *molten* Al dimasukkan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dengan variasi komposisi 5 wt%.
6. Melakukan pengadukan menggunakan *stirrer* grafit kecepatan selama 30 detik.
7. Memasukkan *foaming agent* CaCO<sub>3</sub> sebanyak 1 wt% kedalam *crucible*.
8. Melakukan pengadukan menggunakan *stirrer* grafit dengan kecepatan selama 30 detik.
9. Melakukan *holding* di temperatur 700°C selama 10 menit.
10. Melakukan proses pendinginan *aluminium foam* dengan membiarkannya di udara terbuka.
11. Melakukan proses *machining* untuk menyesuaikan standar pengujian.

### 3.5.2 Prosedur Proses *Precipitation Hardening*

Proses *precipitation hardening* dilakukan dengan tahapan sebagai berikut, diilustrasikan juga pada Gambar 3.2:

1. Menyiapkan spesimen *aluminium foam* yang telah terbentuk dari pengecoran untuk proses *solution hardening*.
2. Memanaskan *furnace* hingga temperatur 530°C.
3. Memasukkan spesimen ke dalam *furnace* dan dilakukan *holding* selama 100 menit.
4. Mendinginkan spesimen dengan melakukan *quenching* dengan media air.
5. Menyiapkan spesimen *aluminium foam* yang telah diberikan *solution treatment* untuk dilakukan *artificial aging*.
6. Memanaskan *furnace* hingga temperatur 165°C.
7. Memasukkan spesimen ke dalam *furnace* dan dilakukan *holding* selama 5 jam.
8. Mendinginkan spesimen dengan membiarkannya di udara terbuka.
9. Melakukan proses *artificial aging* lagi dengan variasi *holding time* selama 6 dan 7 jam.



**Gambar 3. 2** Skema proses *precipitation hardening*.

### 3.6 Proses Pengujian

#### 3.6.1 Pengujian Komposisi

Pengujian komposisi dilakukan melalui *optical emission spectroscopy* (OES). OES merupakan salah satu jenis *atomic spectrometry* yang menggunakan radiasi elektromagnetik yang diabsorpsi dan diemisikan dari atom spesimen. Radiasi tersebut memberikan energi ke atom, membuat konfigurasi atom tidak stabil. Dalam upaya menstabilkan diri, atom akan mengemisikan energi dalam bentuk cahaya. Intensitas cahaya tersebut yang diukur untuk menentukan konsentrasi unsur yang diinginkan. Metode OES yang digunakan adalah *Spark OES*, yang menggunakan listrik dari elektroda ke sampel, yang menghasilkan radiasi yang ditangkap oleh *spectrometer* (Zhou et al., 2005).

#### 3.6.2 Pengujian Densitas dan Porositas

Pengujian densitas pada *aluminium foam* dilakukan dengan dilakukan pembagian massa spesimen ( $m$ ) terhadap volume spesimen ( $v$ ). Spesimen yang diuji menggunakan spesimen uji densitas dengan dimensi 1 cm x 1 cm x 1 cm menggunakan prinsip Archimedes.

#### 3.6.3 Pengujian Mikroskop Stereo

Pengujian struktur makro dari *aluminium foam* yang terbentuk menggunakan Mikroskop Stereo. Pengujian ini menggunakan dimensi berukuran 2.5 cm x 2.5 cm x 2.5 cm. Pengujian ini menggunakan mikroskop stereo Zeiss Stemi DV4 dengan perbesaran 16x.

#### 3.6.4 Pengujian SEM-EDX

Pengujian SEM-EDX atau *Scanning Electron Microscope – Energy Dispersive X-Ray* dari *aluminium foam* yang terbentuk dilakukan dengan cara mengamplas spesimen dari *grade* 80 hingga 2000 dan dietsa menggunakan larutan keller.

#### 3.6.5 Pengujian XRD

Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) merupakan metode pengujian untuk mengetahui unsur tunggal atau senyawa, komposisi, dan ukuran kristal. Sinar-X digunakan untuk menganalisis material dengan menggunakan instrument bernama *X-Ray Diffractometry*. Sinar-X dilontarkan ke spesimen dari sudut yang berbeda-beda sehingga terbentuk spektrum intensitas difraksi dengan sudut antara sinar datang dan sinar difraksi. Spektrum kemudian dibandingkan dengan basis data yang sudah ada (Widyastuti et al., 2019).

#### 3.6.6 Pengujian Kompresi

Pengujian kompresi dilakukan untuk mengetahui kekuatan tekan *aluminium foam*. Pengujian kompresi dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) yang berada di Universitas Negeri Malang. Spesimen yang diuji berukuran 2 cm x 2 cm x 2 cm. Dimensi tersebut sudah sesuai dengan syarat ukuran minimum spesimen uji kompresi untuk *cellular materials*, yaitu minimum 10x ukuran rata-rata porositas atau lebih dari 10 mm menurut standar ISO13314.

#### 3.6.7 Pengujian Impak

Pengujian impak dilakukan untuk mengetahui kemampuan *aluminium foam* yang terbentuk untuk menyerap energi. Pengujian impak dilakukan di jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya menggunakan alat uji impak khusus untuk material non ferrous. Pengujian impak menggunakan dimensi spesimen sesuai standar ASTM E23 yaitu 10 mm x 10 mm x 55 mm dengan takik berbentuk v sedalam 2 mm. Proses pengujian impak *non ferrous* ini menggunakan standar ISO179-1992 dengan pendulum berenergi 12J dan *impact velocity* sebesar 1,9 m/s. Hasil pengujian yang didapatkan adalah sudut akhir pendulum setelah

mengenai spesimen uji. Setelah itu dilakakukan perhitungan untuk mengetahui besaran energi yang terserap oleh spesimen uji.

### 3.7 Rancangan Penelitian

Adapun rancangan penelitian dan pengujian ditunjukkan pada Tabel 3.1 sebagai berikut.

**Tabel 3. 1** Rancangan penelitian

Perlakuan		Spesimen				
		Al Bulk	Non-HT	AA 5	AA 6	AA 7
Perlakuan Panas	Temp. SHT (°C)	-	-	530	530	530
	<i>Holding Time</i> SHT (menit)	-	-	100	100	100
	Temp. Aging (°C)	-	-	165	165	165
	<i>Holding Time</i> Aging (jam)	-	-	5	6	7
Pengujian	Komposisi	✓	-	-	-	-
	Mikroskop Stereo	-	✓	✓	✓	✓
	Densitas & Porositas	-	✓	✓	✓	✓
	SEM-EDX	-	✓	✓	✓	✓
	XRD	-	✓	✓	✓	✓
	Kompresi	-	✓	✓	✓	✓
	Impak	-	✓	✓	✓	✓



### 3.8 Jadwal Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan berdasarkan jadwal yang sudah dirancang sedemikian rupa pada Tabel 3.2 berikut.

**Tabel 3. 2** Jadwal penelitian

Kegiatan	Bulan																		
	Maret				April				Mei				Juni				Juli		
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3
Studi Literatur																			
Asistensi																			
Persiapan Alat dan Bahan																			
Pengujian Komposisi																			
Pengecoran Aluminium Foam																			
Perlakuan Panas																			
Pengujian Mikroskop Stereo																			
Pengujian Densitas dan Porositas																			
Pengujian XRD																			
Pengujian Kompresi																			
Pengujian Impak																			
Pengujian SEM-EDX																			
Analisis Hasil dan Pembahasan																			
Penyusunan Laporan Akhir																			

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil Pengujian Komposisi

Untuk mengetahui komposisi dari material Al *bulk*, dilakukan pengujian *Spark OES* dengan hasil di Tabel 4.1, dibandingkan dengan standar ASM.

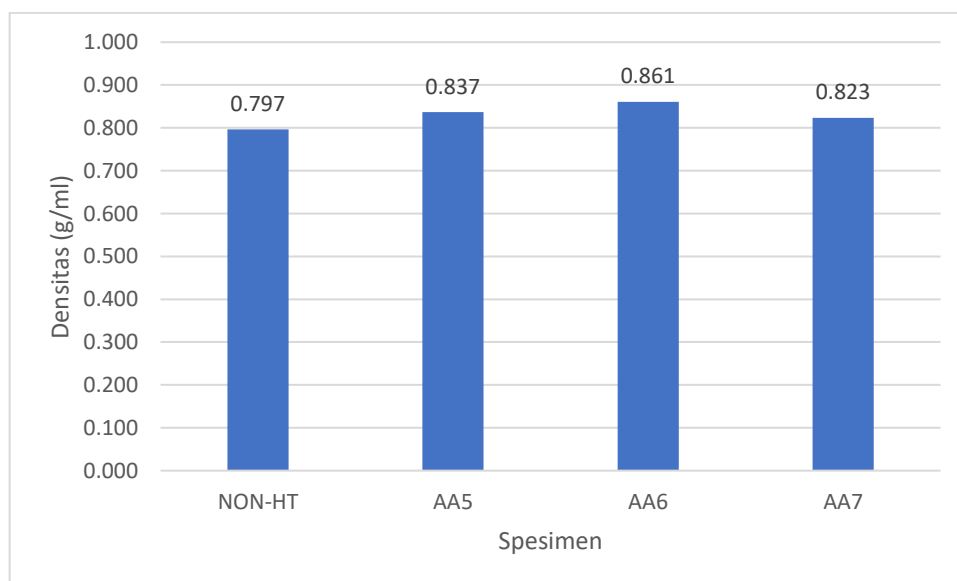
**Tabel 4. 1** Hasil uji *Spark OES* material Al *bulk*.

Unsur	Hasil Uji <i>Spark OES</i> (%)	Standar ASM (%)
Al	97,8	sisia
Mg	0,753	0,80 – 1,20
Si	0,612	0,40 – 0,80
Fe	0,227	Max 0,7
Cu	0,289	0,15 – 0,40
Mn	0,0132	Max 0,15
Cr	0,0936	0,04 – 0,35
Zn	0,0181	Max 0,25
Unsur lainnya	0,1941	Max 0,15

Terdapat perbedaan jumlah unsur dari hasil uji dengan standar yang telah ditentukan oleh *Spark OES*, terutama pada Mg yang berada di luar *range* standar. Seperti yang sudah dibahas di tinjauan pustaka, *artificial hardening* bergantung pada pembentukan  $Mg_2Si$  untuk meningkatkan kemampuan mekaniknya. Sehingga dengan kurangnya unsur Mg pada material dasar, memiliki pengaruh pada jumlah presipitat  $Mg_2Si$  yang terbentuk karena klaster Mg yang terbentuk juga kurang (Gupta et al., 2001).

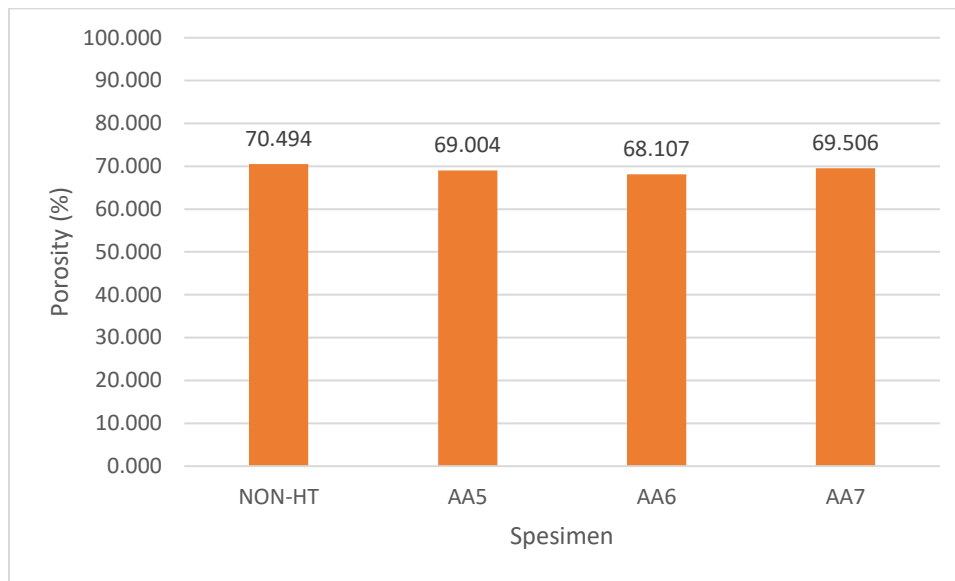
### 4.2 Hasil Pengujian Densitas dan Porositas

Dilakukan pengujian dengan membagi massa dengan volume spesimen, menggunakan metode archimedes untuk mencari nilai densitas dan porositas setelah proses pembuatan *aluminium foam*. Dari pengujian yang dilakukan, ditemukan hasil seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1.



**Gambar 4. 1** Hasil pengujian densitas pada spesimen.

Dari hasil pengujian, ditemukan densitas dari semua sampel berada pada *range* 0,797 – 0.861 g/ml dengan rata-rata 0,829 g/ml. Dibandingkan dengan densitas paduan awal sebesar 2.7 g/ml dan juga penambahan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dengan densitas 3,95 g/ml pada proses pembuatan *foam*. Pengurangan densitas ini disebabkan oleh pengembangan volume spesimen karena dekomposisi *foaming agent*  $\text{CaCO}_3$ . Menurut Aboraia, densitas *aluminium foam* berada di bawah 1 g/ml (Aboraia et al., 2011). Perbedaan densitas pada tiap spesimen dapat diatribusikan pada keberhasilan dekomposisi  $\text{CaCO}_3$  seperti pada persamaan 2.4 – 2.6, yang dipengaruhi oleh temperatur, *stirring time*, dan *holding time* pada saat proses pengecoran.



**Gambar 4. 2** Hasil perhitungan porositas pada spesimen.

Menggunakan persamaan 2.1 – 2.3, data diambil dari hasil pengujian densitas dan dilakukan perhitungan porositas. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2, ditemukan hasil porositas dengan *range* 69,506 – 70,494% dengan rata-rata 69,278%. Menurut Rajak, porositas sekitar 70% menghasilkan pori berbentuk *spherical*, yang merupakan bentuk pori paling kuat.

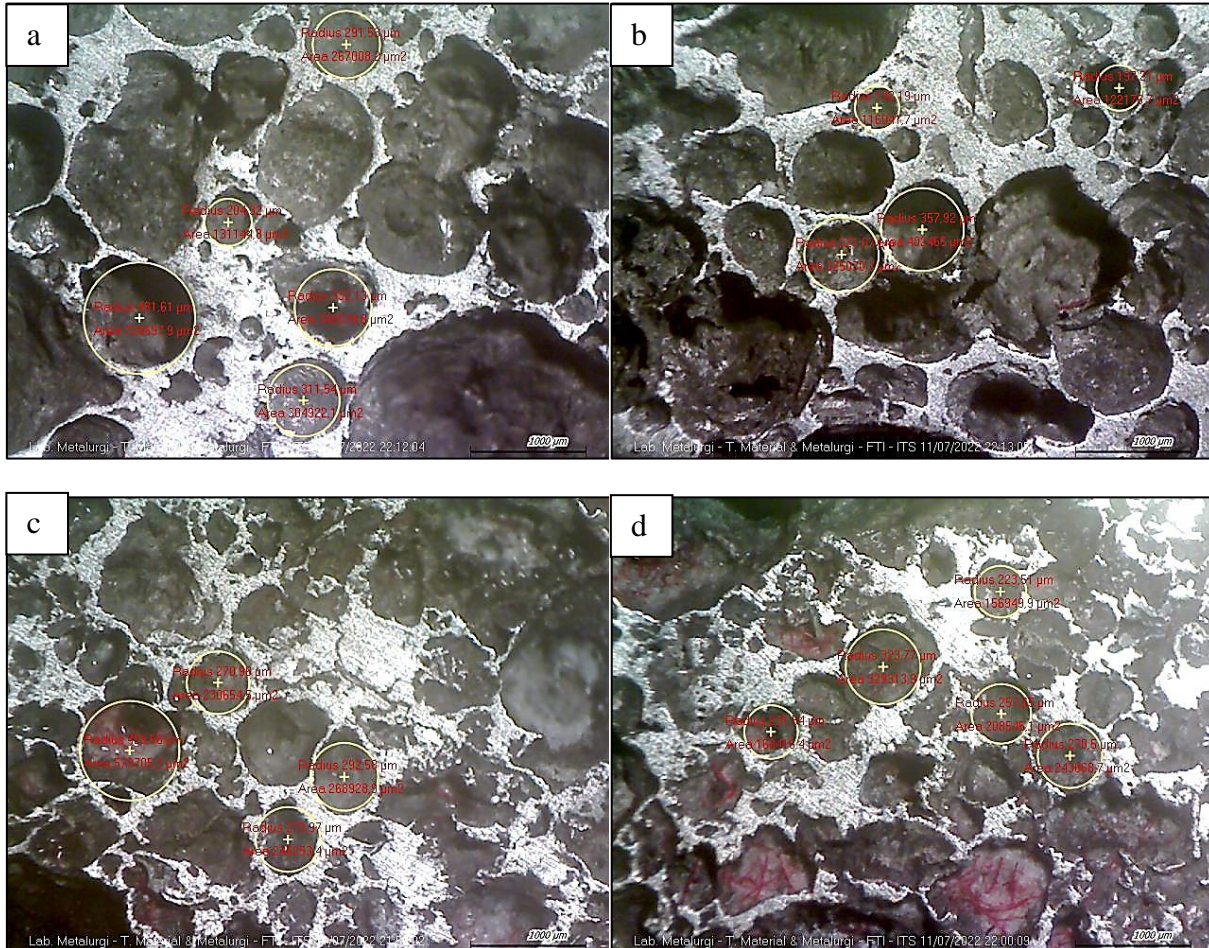
### 4.3 Hasil Pengujian Mikroskop Stereo

Menggunakan mikroskop stereo Zeiss Stemi DV4 dengan perbesaran 16x, didapatkan hasil seperti pada Gambar 4.3 dengan rincian ukuran pada Tabel 4.2. Dari Gambar tersebut, dapat dilihat ukuran dan bentuk dari porositas yang terbentuk dari dekomposisi  $\text{CaCO}_3$  pada permukaan dari 4 sampel. Dari keempat Gambar, didapatkan rata-rata porositas sebesar 0,277 mm dengan nilai terkecil sebesar 0,122 mm pada sampel keempat dan nilai terbesar sebesar 0,481 mm pada sampel kedua.

Selain itu, dapat dilihat pula bentuk, persebaran, dan homogenitas dari pori yang terbentuk. Dari Gambar 4.3, dapat dilihat bahwa bentuk pori adalah *spherical*, sesuai dengan dasar teori dan hubungannya dengan porositas. Namun, persebaran pori masih belum merata dan ukuran pori yang belum homogen. Hal ini disebabkan karena runtuhnya sel pori setelah proses produksi *aluminium foam*. Runtuhnya sel ini dapat disebabkan oleh beberapa hal, seperti tidak meratanya persebaran  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , sehingga viskositas tidak merata, menyebabkan beberapa dinding sel mudah runtuh. Alasan lainnya adalah ketika proses pemotongan, beberapa dinding sel ikut tertarik mata gergaji, sehingga sel menjadi runtuh.

**Tabel 4. 2** Ukuran pori dari spesimen.

Spesimen	Rentang Ukuran Pori (mm)	Rata-Rata (mm)
Non-HT	0,204 – 0,481	0,324
AA5	0,122 – 0,358	0,218
AA6	0,221 – 0,430	0,304
AA7	0,224 – 0,324	0,262

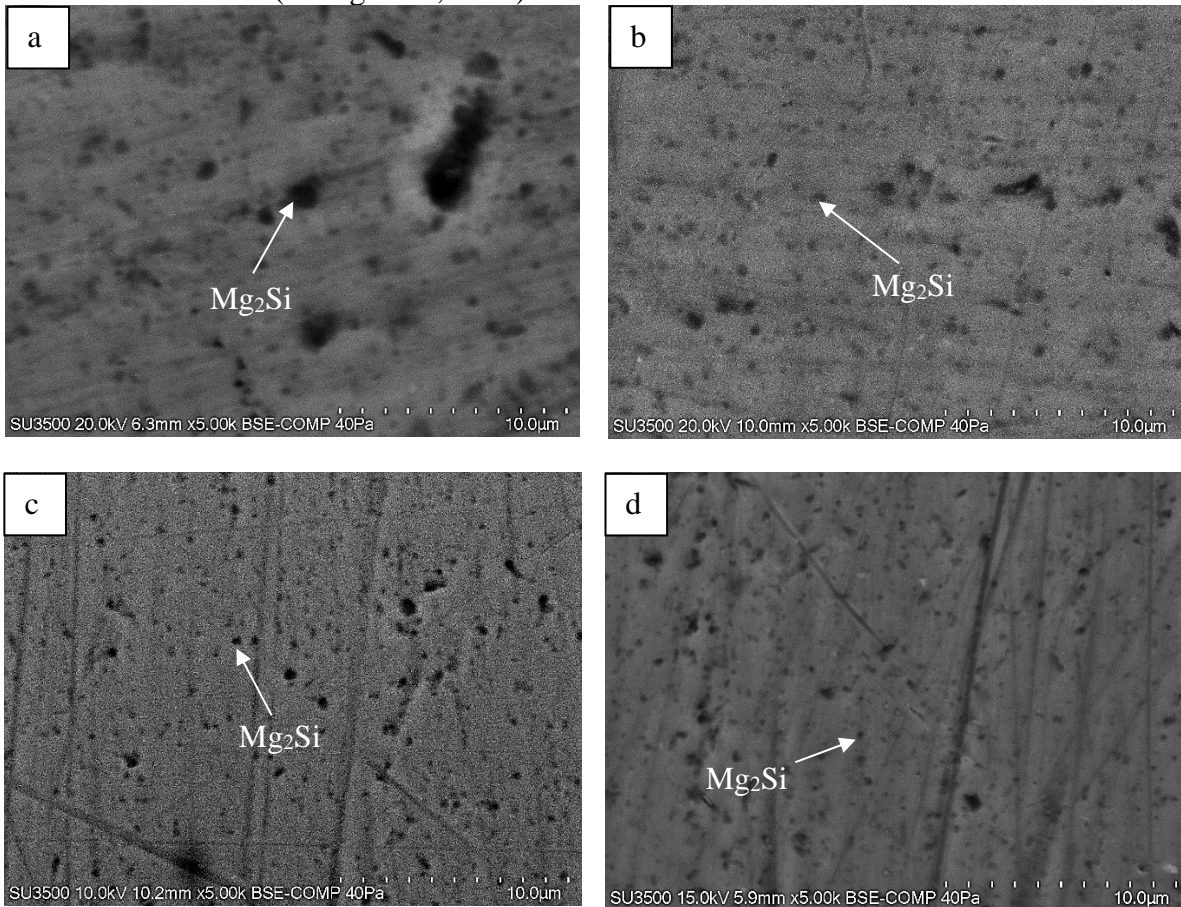


**Gambar 4. 3** Hasil pengujian mikroskop stereo pada permukaan dari 4 sampel spesimen: (a) Non-HT, (b) AA5, (c) AA6, (d) AA7.

#### 4.4 Hasil Pengujian SEM-EDX

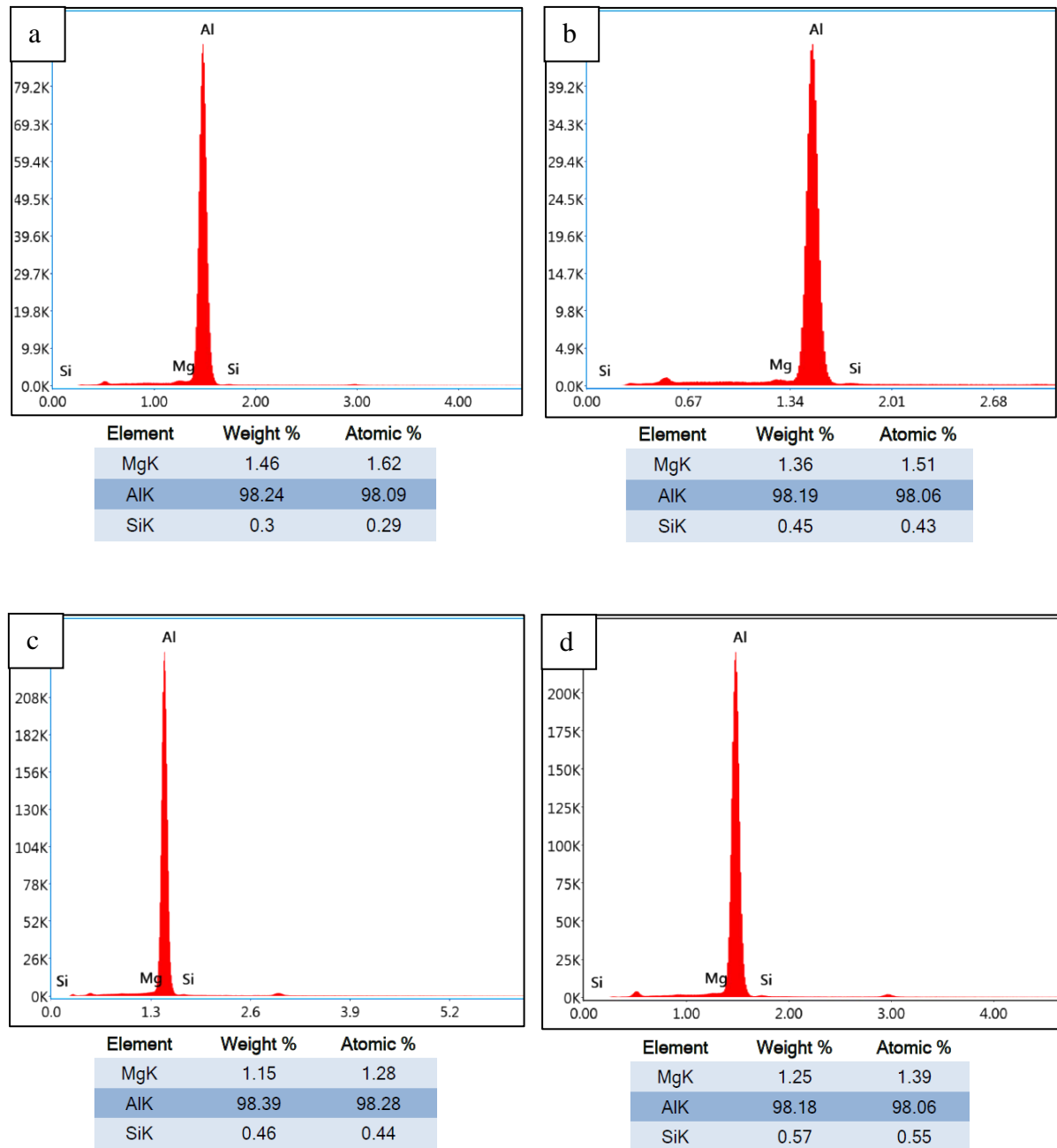
Pada hasil pengamatan SEM, dapat dilihat beberapa spot hitam pada semua spesimen. Pada spesimen Non-HT, spot hitam ini cenderung lebih besar dari spesimen lainnya. Menurut jurnal, keberadaan Mg dan Si larut di aluminium secara partial dalam proses pengecoran, dan juga secara partial membentuk fasa intermetalik (Grażyna et al., 2021). Berbeda dengan spesimen yang telah diberikan perlakuan panas *precipitation hardening*. Dalam proses *precipitation hardening*, spesimen melalui proses *solution treatment*, dimana fasa menyatu dan di-*quench* sehingga membentuk *super saturated solid solution*. Karena proses ini, Mg dan Si larut di dalam Al. Proses kedua dalam *precipitation hardening*, yaitu *aging*, bertujuan untuk mengeluarkan Mg dan Si secara perlahan hingga membentuk presipitat Mg<sub>2</sub>Si. Hal inilah yang terjadi pada spesimen AA5, AA6, dan AA7. Pada Gambar 4. 4 Hasil pengamatan SEM, menunjukkan spesimen (a) Non-HT, (b) AA5, (c) AA6, dan (d) AA7., terlihat bintang-bintang

hitam yang memenuhi permukaan spesimen, titik ini berukuran sangat kecil dan terendap secara fisik di antara fasa Al (Zhang et al., 2016).



**Gambar 4. 4** Hasil pengamatan SEM, menunjukkan spesimen (a) Non-HT, (b) AA5, (c) AA6, dan (d) AA7.

Selain SEM, dilakukan pula pengujian EDX untuk mengetahui jumlah unsur pada tiap spesimen seperti pada Gambar 4. 5. Unsur yang diamati adalah Al, Mg, dan Si, sebagai penyusun utama dari paduan. Dapat dilihat perbedaan persentase unsur pada tiap spesimen, dimana spesimen Non-HT memiliki Mg wt% sebesar 1,46%, AA5 sebesar 1,15%, AA6 sebesar 1,36%, dan AA7 sebesar 1,25%. Hasil pengujian juga mendeteksi adanya Si dengan persentase pada spesimen Non-HT sebesar 0,3%, AA5 sebesar 0,45%, AA6 sebesar 0,46%, dan AA7 sebesar 0,57%. Berdasarkan ASM, rasio Mg<sub>2</sub>Si adalah 1,73:1 apabila melihat persentase massanya. Dengan asumsi Si berikatan semua, didapatkan nilai Mg<sub>2</sub>Si setiap spesimen sebesar, 0,819% untuk spesimen Non-HT, 1,229% untuk spesimen AA5, 1,256% untuk spesimen AA6, dan 1,556% untuk spesimen AA7. Terdapat tren kenaikan jumlah Mg<sub>2</sub>Si pada spesimen perlakuan panas, sesuai dengan dasar teori *precipitation hardening*. Spesimen Non-HT merupakan *outlier* karena pada pengecoran, proses pendinginan lambat akan menyebabkan Mg dan Si yang keluar tanpa bisa dikontrol.

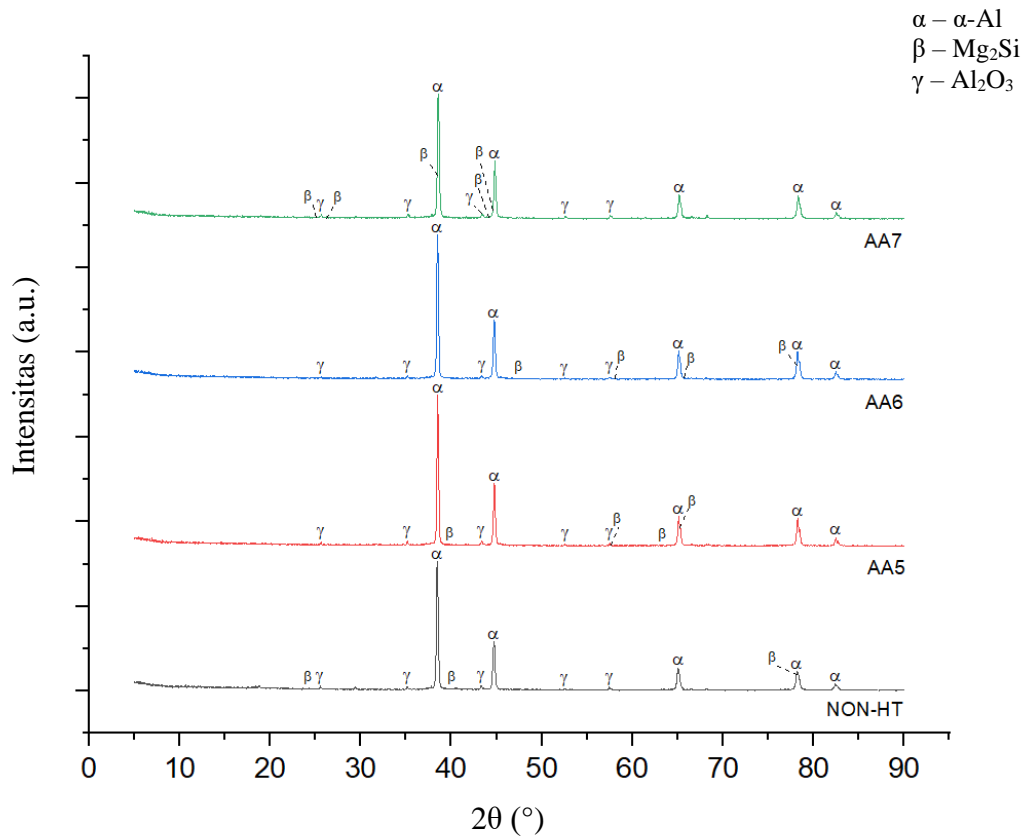


**Gambar 4.5** Hasil analisis EDX pada spesimen: (a) Non-HT, (b) AA5, (c) AA6, dan (d) AA7.

#### 4.5 Hasil Pengujian XRD

Dilakukan pengujian XRD untuk mencari unsur yang terdapat pada tiap material dan juga fasa yang terbentuk. Hasil pengujian terdapat pada Gambar 4.6. Hasil pengujian XRD menunjukkan beberapa peak yang tampak seperti pada Gambar 4.6. Setelah dilakukan analisis menggunakan perangkat lunak *Highscore*, ditemukan bahwa *peak* tersebut merupakan *peak*  $\alpha$ -Al dengan *reference code* 00-004-0787. Dengan menggunakan rasio dari *peak*  $\alpha$ -Al (111) dan (200) yang diperoleh dari *reference code*, dapat ditentukan *atomic packing factor* dan ditentukan struktur kristalnya, yang berupa FCC pada semua spesimen. Terdapat juga  $Al_2O_3$  pada semua hasil dikarenakan pada proses *foaming*,  $Al_2O_3$  digunakan sebagai *stabilizer* dan diaduk hingga menyatu dengan lelehan Al. Selain kedua puncak yang signifikan tersebut,

terdapat juga unsur  $Mg_2Si$  dengan *reference code* 01-073-2246. Namun karena berbentuk presipitat yang sangat kecil, unsur tersebut menyatu dengan *background*.



**Gambar 4. 6** Hasil pengujian XRD dari spesimen.

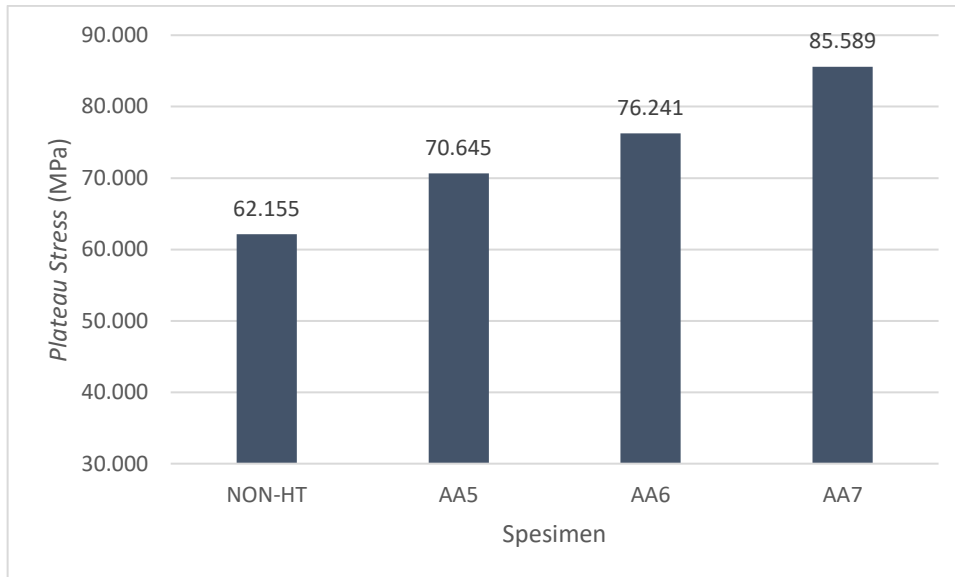
Keberadaan fasa pada spesimen Non-HT dapat dihubungkan dengan diagram fasa, dimana  $Mg_2Si$  terbentuk secara alami karena pendinginan lambat. Seperti yang sudah dibahas pada hasil pengujian SEM,  $Mg_2Si$  yang terdapat pada spesimen ini berbeda dengan  $Mg_2Si$  yang terdapat pada spesimen yang telah diberikan perlakuan panas, karena pada spesimen Non-HT,  $Mg_2Si$  yang ada tidak berbentuk presipitat, sementara pada spesimen lainnya telah melalui proses *solution treatment* dan menghasilkan presipitat pada proses *aging*. AA5 dan AA6 menunjukkan jumlah  $Mg_2Si$  yang sama, namun AA7 menunjukkan kenaikan jumlah unsur  $Mg_2Si$ . Hal ini dapat dilihat pada hasil pengujian EDX, dimana jumlah peak  $Mg_2Si$  tiap spesimen sebanding dengan persentase  $Mg_2Si$  pada spesimen. Dengan menggunakan rasio dari *peak*  $Mg_2Si$  (111), dapat ditentukan *atomic packing factor*  $Mg_2Si$  berupa FCC.

Selain itu, pengaruh keberadaan presipitat dapat dilihat dari perubahan  $2\theta$  dari setiap spesimen. Spesimen Non-HT memiliki *peak*  $\alpha$ -Al (111) pada  $2\theta$  38,429°, AA5 pada  $2\theta$  38.482°, AA6 pada  $2\theta$  38.451°, dan AA7 pada  $2\theta$  38.543°. Dapat dilihat bahwa sudut difraksi berbeda dari satu sama lain, mengindikasikan pengaruh fasa presipitat (Chen et al., 2020).

#### 4.6 Hasil Pengujian Kompresif

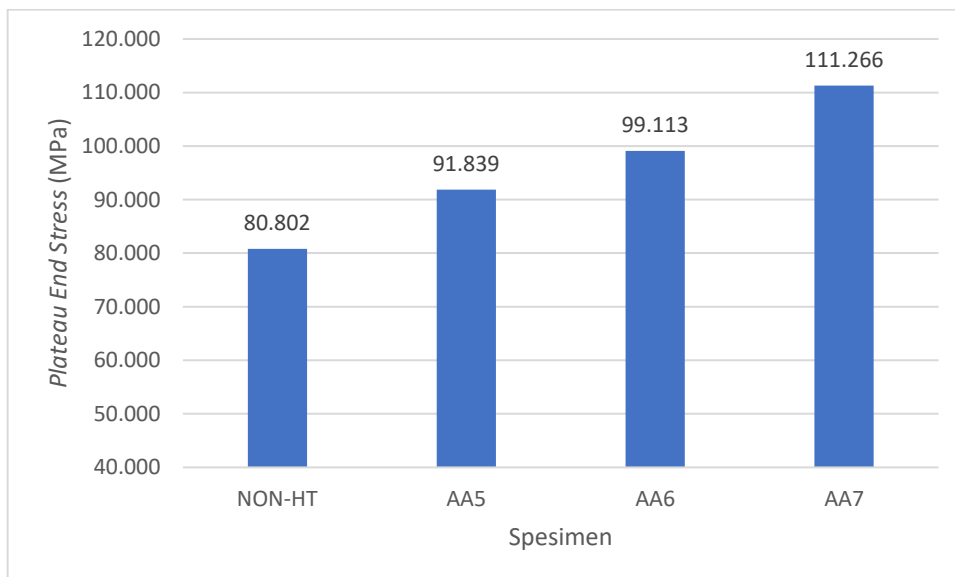
Pengujian kompresi dilakukan untuk mencari *plateau stress*, *plateau end stress*, serta absorpsi energy yang dapat diterima oleh spesimen. Spesimen mengikuti standar ASTM E9 dan diuji menggunakan *Universal Testing Machine*. Dari pengujian, didapatkan hasil seperti pada Gambar 4. 7 *Average plateau stress* pada spesimen., Gambar 4. 8, dan Gambar 4. 9





**Gambar 4. 7** Average plateau stress pada spesimen.

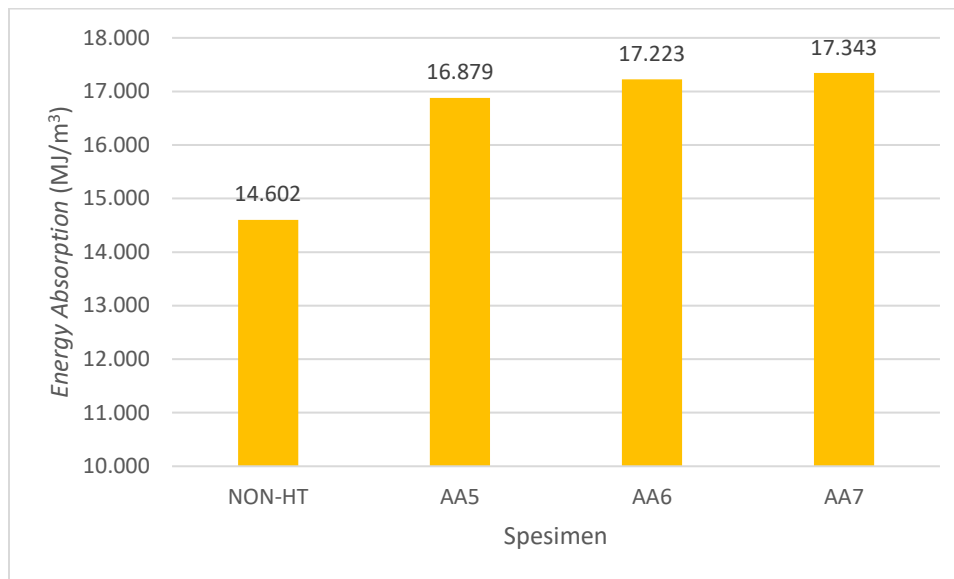
Gambar 4. 7 menunjukkan perbandingan *plateau stress* pada tiap spesimen, yang merupakan titik dimana pertambahan tegangan cenderung minimal dan membentuk garis lurus pada grafik. Pengambilan titik *plateau stress* ditentukan sesuai dengan standar ISO13314, dimana tegangan pada regangan 20% hingga 40% diambil dan dirata-ratakan (ISO, 2011). Dari grafik, dapat dilihat bahwa terdapat tren dimana semakin lama waktu *aging*, maka *plateau stress* semakin naik pula, dengan nilai terendah pada spesimen Non-HT sebesar 62,155 MPa dan tertinggi pada AA7, sebesar 85,589 MPa.



**Gambar 4. 8** Plateau end stress pada spesimen.

Selanjutnya pada Gambar 4. 8, terdapat grafik perbandingan *plateau end stress* pada tiap spesimen, yang merupakan titik dimana sel *foam* mulai hancur dan terdapat kenaikan tegangan secara drastis. Menurut ISO13314, metode pengambilan titik *plateau end* dilakukan dengan mengambil titik di 1,3x dari *plateau stress*, atau dengan mengambil titik menggunakan metode interseksi tangen seperti pada tinjauan pustaka. Dari metode tersebut, ditemukan hasil

seperti pada grafik, dimana spesimen Non-HT memiliki nilai *plateau end* terendah, sebesar 80,802 MPa dan spesimen AA 7 sebesar 111,266 MPa.



**Gambar 4. 9** Absorpsi energi pada spesimen.

Dari penentuan titik densifikasi, dapat dihitung energi yang dapat diserap oleh spesimen seperti pada Gambar 4. 9. Perhitungan absorpsi energi dilakukan dengan cara menghitung luas daerah di bawah tegangan di antara titik nol dan titik densifikasi seperti pada Gambar 2.1. Proses ini diautomasi menggunakan aplikasi Origin. Dari hasil perhitungan, didapatkan tren naiknya absorpsi energi seiring lamanya waktu *aging*, dengan nilai terendah sebesar 14,603 MJ/m<sup>3</sup> pada spesimen Non-HT dan 17,343 MJ/m<sup>3</sup> pada spesimen AA7.

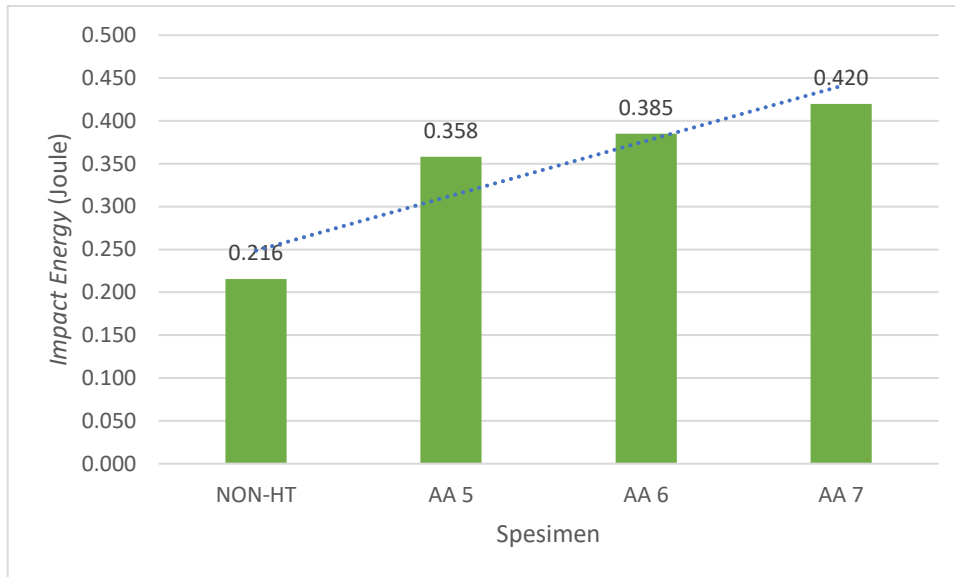
Dari ketiga grafik, dapat dilihat kenaikan nilai secara konsisten seiring naiknya waktu *aging*. Hal ini sesuai dengan dasar teori dimana terjadinya pembentukan presipitat Mg<sub>2</sub>Si pada proses *aging* tersebut.. Lebih rendahnya nilai kekuatan pada AA5 dan 6 dibandingkan dengan AA7 dapat diatribusikan pada jumlah Mg<sub>2</sub>Si yang terbentuk, seperti yang dapat dilihat pada pembahasan XRD.

#### 4.7 Hasil Pengujian Impak

Pengujian impak dilakukan dengan mengikuti standar ISO179 dengan menggunakan metode Charpy. Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 4. 10 dan Gambar 4. 11. Dari Gambar tersebut, dapat dilihat perbandingan dari tiap spesimen. Nilai energi impak didapatkan dari pPerhitungan 4.1 dan Perhitungan 4.2, sesuai dengan standar ISO menggunakan bandul dengan berat 1,34 kg.

$$\text{Impact Energy (IE)} = mgL(\cos(\beta) - \cos(\alpha)) \quad (4.1)$$

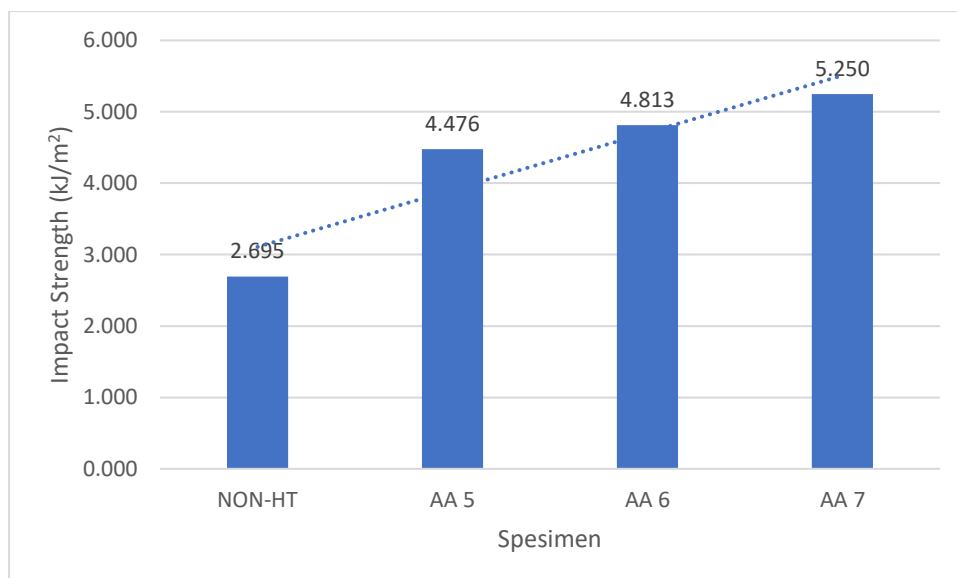
$$\text{Impact Strength (IS)} = \frac{IE}{A} \quad (4.2)$$



**Gambar 4. 10** Hasil pengujian impact pada spesimen.

Dari perhitungan tersebut, didapatkan hasil dengan nilai terendah pada spesimen Non-HT dengan energi impact sebesar 0,216 Joule, dan yang tertinggi sebesar 0,420 joule pada spesimen AA 7. Untuk mencari kekuatan impact dari spesimen, dilakukan perhitungan seperti pada rumus 4.2. Setelah dihitung, didapatkan nilai terkecil pada spesimen Non-HT sebesar 2,695 kJ/m<sup>2</sup> dan nilai terbesar pada spesimen AA7 dengan nilai sebesar 5,250 kJ/m<sup>2</sup>.

Melihat kedua set data impact, dapat dilihat kecenderungan naiknya nilai energi impact dan kekuatan impact seiring dengan lamanya *aging*. Hal ini konsisten dengan dasar teori dimana presipitat Mg<sub>2</sub>Si semakin banyak terbentuk semakin lama spesimen ditahan pada temperatur *aging*. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa *holding time* pada *artificial aging* memiliki pengaruh pada kapabilitas impact dari *aluminium foam*.



**Gambar 4. 11** Hasil konversi energi impact ke kekuatan impact.

#### 4.8 Korelasi Antara Karakteristik Fisik dan Mekanik *Foam* Paduan Al-Mg-Si

Penelitian ini memiliki tujuan untuk menganalisis pengaruh *holding time artificial aging* terhadap karakteristik *foam* paduan Al-Mg-Si yang dimanufaktur menggunakan *foaming agent*  $\text{CaCO}_3$  dan *stabilizer*  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Hasil pembuatan *foam* Aluminium kemudian diberikan perlakuan panas *precipitation hardening*, dengan variasi pada waktu *artificial aging* selama 5, 6, dan 7 jam. Spesimen tanpa perlakuan juga diuji sebagai pembanding.

Spesimen Non-HT atau tanpa perlakuan secara konsisten memiliki sifat mekanik dan fisik yang paling rendah di antara semua spesimen. Hal ini dikarenakan dengan tidak adanya perlakuan panas apapun, spesimen Non-HT tidak memiliki karakteristik apapun yang membantu menaikkan sifat tersebut. Berbeda dengan spesimen AA5, AA6, dan AA7 yang telah diberikan perlakuan panas *precipitation hardening*. Perlakuan panas tersebut memberikan presipitat yang mampu menahan deformasi pada spesimen. Presipitat tersebut berupa senyawa  $\text{Mg}_2\text{Si}$  yang berukuran sangat kecil. Untuk mencari tahu apabila spesimen memiliki senyawa tersebut, dilakukan pengujian SEM-EDX dan XRD. Dari pengujian tersebut, ditemukan bahwa  $\text{Mg}_2\text{Si}$  terdapat pada semua spesimen, termasuk pada spesimen Non-HT. seperti yang terlihat pada hasil XRD. Hal ini dapat dijelaskan menggunakan diagram fasa dan juga pada hasil pengujian SEM-EDX. Dari diagram fasa pada Gambar 2.13, dapat dilihat bahwa terdapat fasa Al+ $\text{Mg}_2\text{Si}$ . Keberadaan  $\text{Mg}_2\text{Si}$  dapat diatribusikan pada proses pengecoran yang mencapai temperatur  $750^\circ\text{C}$ , seluruh fasa melebur menjadi satu. Seiring mendinginnya hasil pengecoran di udara terbuka, leburan akan mendingin, memasuki fasa Al dimana unsur lainnya larut dalam Al. Namun, ketika hasil pengecoran semakin mendingin lagi, akan menyentuh batas fasa berikutnya, dimana unsur yang larut keluar lagi dan bereaksi satu sama lain, dalam kasus ini,  $\text{Mg}_2\text{Si}$  terbentuk kembali. Berbeda dengan spesimen *precipitation hardening*, dimana ketika semua unsur dilarutkan pada temperatur  $530^\circ\text{C}$ , spesimen di-*quench* agar terbentuk SSSS (*super-saturated solid solution*) dimana Mg dan Si telarut dalam Al. Proses selanjutnya, yaitu *aging* mengeluarkan klaster Mg dan Si secara perlahan, membentuk endapan atau presipitat seiring lamanya *holding time*.

Sebaliknya, spesimen AA7 atau spesimen dengan *holding time artificial aging* 7 jam secara konsisten memiliki sifat mekanik tertinggi. Hal ini disebabkan karena beberapa hal. Secara konsep, *artificial aging* mengeluarkan Mg dan Si secara bertahap, sehingga membatasi ukuran  $\text{Mg}_2\text{Si}$  yang terbentuk. Dapat dilihat pada hasil pengujian XRD dan SEM-EDX, spesimen AA7 memiliki ukuran partikel  $\text{Mg}_2\text{Si}$  terbesar dan jumlah *peak* terbanyak dari semua spesimen. Oleh karena itu, presipitat dapat menahan lebih banyak deformasi, alhasil sifat mekanik spesimen inilah yang tertinggi.

Terdapat beberapa *outlier* dalam hasil pengujian, seperti spesimen AA5 dan AA6 yang memiliki jumlah *peak* yang sama pada pengujian XRD, namun AA6 secara konsisten memiliki sifat mekanik yang lebih tinggi dari spesimen AA5. Hal ini dapat dijelaskan dari hasil perhitungan ukuran partikel  $\text{Mg}_2\text{Si}$  yang terbentuk pada pengujian SEM-EDX, dimana spesimen AA6 memiliki ukuran partikel lebih besar dari spesimen AA5. Secara teori, hal ini memberikan kemampuan menahan deformasi lebih tinggi, sehingga sifat mekaniknya lebih tinggi juga (Donovan et al., 2015).

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan pembahasan yang telah dilakukan pada penelitian ini, dapat ditarik beberapa kesimpulan:

1. Dari diberikannya variasi *holding time artificial aging* selama 5, 6, dan 7 jam, dihasilkan pertumbuhan partikel  $Mg_2Si$  yang dapat dilihat dari hasil pengujian Densitas, Porositas, SEM-EDX, dan XRD. Pada hasil densitas dan porositas, dapat dilihat bahwa perbedaan antar spesimen tidak menunjukkan tren dan terbentuk pori *spherical*. Spesimen Non-HT memiliki densitas dan porositas sebesar 0,797 g/ml dan 70,494%; spesimen AA5 0,837 g/ml dan 69,004%; spesimen AA6 0,861 g/ml dan 68,107%, serta AA7 0,823 g/ml dan 69,506%. Dibandingkan dengan spesimen Non-HT, seluruh spesimen yang telah diberikan perlakuan panas menunjukkan perbedaan pada hasil SEM-EDX, dimana fasa yang besar telah hilang pada saat *solution treatment*. Spesimen Non-HT menunjukkan 3 *peak*  $Mg_2Si$  dan persentase  $Mg_2Si$  sebanyak 0,819%. Spesimen AA5 memiliki 4 *peak*  $Mg_2Si$  yang terdeteksi pada XRD dan persentase  $Mg_2Si$  sebanyak 1,229% yang dihitung dari hasil uji SEM-EDX. Spesimen AA6 memiliki jumlah *peak* yang sama, namun persentase yang lebih tinggi, sebesar 1,256%. Dan terakhir, spesimen AA7 memiliki 5 *peak* yang terdeteksi dan persentase  $Mg_2Si$  sebesar 1,556%. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa semakin lama *holding time artificial aging*, semakin banyak  $Mg_2Si$  yang tumbuh.
2. Dengan tumbuhnya presipitat  $Mg_2Si$ , dihasilkan perubahan sifat mekanik yang dapat dilihat dari pengujian kompresi dan impak. Dibandingkan dengan spesimen Non-HT, spesimen *aging* secara konsisten menunjukkan hasil pengujian sifat mekanik yang lebih tinggi. Spesimen Non-HT menunjukkan *plateau stress* sebesar 62,155 MPa, *plateau end stress* sebesar 80,802 MPa, *energy absorption* sebesar 14,602 MJ/m<sup>3</sup>, serta *impact strength* sebesar 2,695 kJ/m<sup>2</sup>. Spesimen AA5 memiliki sifat mekanik terendah dari ketiga variasi waktu dengan nilai *plateau stress* sebesar 70,645 MPa, *plateau end stress* sebesar 91,839 MPa, *energy absorption* sebesar 16,879 MJ/m<sup>3</sup>, serta *impact strength* sebesar 4,476 kJ/m<sup>2</sup>. Berikutnya spesimen AA6 memiliki nilai *plateau stress* sebesar 76,241 MPa, *plateau end stress* sebesar 99,113 MPa, *energy absorption* sebesar 17,223 MJ/m<sup>3</sup>, serta *impact strength* sebesar 4,813 kJ/m<sup>2</sup>. Terakhir, spesimen AA7 memiliki sifat mekanik paling tinggi, dengan nilai *plateau stress* sebesar 85,589 MPa, *plateau end stress* sebesar 111,266 MPa, *energy absorption* sebesar 17,343 MJ/m<sup>3</sup>, serta *impact strength* sebesar 5,250 kJ/m<sup>2</sup>. Dengan ini, dapat disimpulkan bahwa semakin lama *holding time artificial aging*, maka kapabilitas mekanik *aluminium foam* akan semakin meningkat.

### 5.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya dengan topik terkait, yaitu:

1. Menggunakan *resistance furnace* agar temperatur mudah dikontrol.
2. Melakukan pengujian TEM agar presipitat lebih mudah dilihat.
3. Mencari tahu titik *overaging* pada spesimen.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR PUSTAKA

- A. Osman, H., . M. Omran, A., . A. Atlam, A., & M. Kh., M. (2017). CHARACTERIZATION OF ALUMINIUM FOAM PRODUCED FROM ALUMINIUM SCRAP BY USING  $\text{CaCO}_3$  AS FOAMING AGENT. *JES. Journal of Engineering Sciences*, 45(4), 448–459. <https://doi.org/10.21608/jesaun.2017.116283>
- Abdillah, F. (2010). *Perlakuan Panas Paduan Al-Si Pada Prototipe Piston Berbasis Material Piston Bekas*. UNIVERSITAS DIPONEGORO SEMARANG.
- Aboraia, M., Sharkawi, R., & Doheim, M. A. (2011). Production of Aluminium Foam and the Effect of Calcium Carbonate As a Foaming Agent. *JES. Journal of Engineering Sciences*, 39(2), 441–451. <https://doi.org/10.21608/jesaun.2011.127552>
- An, J., Chen, C., & Zhang, M. (2021). Effect of  $\text{CaCO}_3$  content change on the production of closed-cell aluminum foam by selective laser melting. *Optics and Laser Technology*, 141(February), 107097. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107097>
- Annigeri, U. K., & Veeresh Kumar, G. B. (2017). Method of stir casting of Aluminum metal matrix Composites: A review. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 1140–1146. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.130>
- Ardiansyah, A. (2021). *PENGARUH VARIASI STABILIZER  $\text{Al}_2\text{O}_3$  TERHADAP KARAKTERISTIK DAN SIFAT MEKANIK ALUMINIUM FOAM DENGAN FOAMING AGENT  $\text{CaCO}_3$* . Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- ASM International. (1990). ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. In *ASM International*. ASM.
- ASM International. (1991). *ASM Handbook Volume 4: Heat Treating*.
- Ay, I., Çelik, S., & Çelik, I. (2000). Comparison of Properties of Friction and Diffusion Welded Joints Made Between The Aluminium And Copper Bars. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2(1), 88–102.
- Basit, M. M., & Cheon, S. S. (2019). Time-dependent crashworthiness of polyurethane foam. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 23(2), 207–221. <https://doi.org/10.1007/s11043-018-9391-2>
- Boljanovic, V. (2010). *Metal Shaping Processes: Casting and Molding, Particulate Processing, Deformation Processes, and Metal Removal*. Industrial Press Inc.
- Chen, Y., Lu, B. Q., & Zhang, H. A. (2020). Hardening and precipitation of a commercial 6061 Al alloy during natural and artificial ageing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 770(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/770/1/012065>
- Constantin, B. A., Iozsa, D., & Fratila, G. (2016). Studies about the Behavior of the Crash Boxes of a Car Body. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 160(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/160/1/012010>
- Curran, D. C. (2003). *Aluminium foam production using calcium carbonate as a foaming agent*. 188. <https://www.repository.cam.ac.uk/handle/1810/252945>
- Davis, J. R. (2001). Aluminium and Aluminium Alloys. *Alloying: Understanding the Basics*, 351–416. <https://doi.org/10.1361/autb2001p351>
- DeGarmo, E. P., Black, J. T., & Kohser, R. A. (2003). *Materials and Processes in Manufacturing* (9th ed.). Wiley.
- Donovan, R., Fortune, R., & Trout, R. (2015). *Elevated Temperature Effects on the Mechanical Properties of Age Hardened 6xxx Series Aluminum Alloy Extrusions*. June.
- Ghaleh, M. H., Ehsani, N., & Baharvandi, H. R. (2021). High-Porosity Closed-Cell Aluminum Foams Produced by Melting Method Without Stabilizer Particles. *International Journal of Metalcasting*, 15(3), 899–905. <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00528-w>
- Grażyna, M. N., Gancarczyk, K., Nowotnik, A., Dychtoń, K., & Boczekal, G. (2021).

- Microstructure and properties of as-cast and heat-treated 2017a aluminium alloy obtained from scrap recycling. *Materials*, 14(1), 1–25. <https://doi.org/10.3390/ma14010089>
- Gupta, A. K., Lloyd, D. J., & Court, S. A. (2001). Precipitation hardening in Al–Mg–Si alloys with and without excess Si. *Materials Science and Engineering: A*, 316(1–2), 11–17. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01247-3](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01247-3)
- Heidari Ghaleh, M., Ehsani, N., & Baharvandi, H. R. (2021). Compressive Properties of A356 Closed-Cell Aluminum Foamed with a CaCO<sub>3</sub> Foaming Agent Without Stabilizer Particles. *Metals and Materials International*, 27(10), 3856–3861. <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00807-5>
- Hussein, S. G., Al-Shammari, M. A., Takhakh, A. M., & Al-Waily, M. (2020). Effect of heat treatment on mechanical and vibration properties for 6061 and 2024 aluminum alloys. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 43(1), 48–66.
- Idris, M. I., Vodenitcharova, T., & Hoffman, M. (2009). Mechanical behaviour and energy absorption of closed-cell aluminium foam panels in uniaxial compression. *Materials Science and Engineering A*, 517(1–2), 37–45. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.03.067>
- Iljoon Jin, Kingston; Lorne D. Kenny, I. H. S. K. (1990). *United States Patent- METHOD OF PRODUCING LIGHTWEIGHT FOAMED METAL*. 96(19), 62–66.
- ISO. (2011). Mechanical Testing of Metals—ductility Testing—compression Test for Porous and Cellular Metals. *International Organization for Standardization, 2011*.
- Kammer, C. (1999). Aluminium Foam. *TALAT - Training Aluminium Application Technologies*, 1–24.
- Karunadasa, K. S. P., Manoratne, C. H., Pitawala, H. M. T. G. A., & Rajapakse, R. M. G. (2019). Thermal decomposition of calcium carbonate (calcite polymorph) as examined by in-situ high-temperature X-ray powder diffraction. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 134(January), 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2019.05.023>
- Kevorkijan, V. (2010). LOW COST ALUMINIUM FOAMS MADE BY CaCO<sub>3</sub> PARTICULATES. *Association of Metallurgical Engineers of Serbia AMES*.
- Kumar, M., Baloch, M. M., Abro, M. I., Memon, S. A., & Chandio, A. D. (2019). Effect of Artificial Aging Temperature on Mechanical Properties of 6061 Aluminum Alloy. *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*, 38(1), 31–36. <https://doi.org/10.22581/muet1982.1901.03>
- Lehmhus, D., & Banhart, J. (2003). Properties of heat-treated aluminium foams. *Materials Science and Engineering A*, 349(1–2), 98–110. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00582-8](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00582-8)
- Leon, J. S., & Jayakumar, V. (2015). Investigation of Mechanical Properties of Aluminium 6061 Alloy Friction Stir Welding. *International Journal of Students' Research in Technology & Management*, 2(4), 140–144.
- Lumley, R. N. (2010). Fundamentals of aluminium metallurgy: Production, processing and applications. In *Fundamentals of Aluminium Metallurgy: Production, Processing and Applications*. <https://doi.org/10.1533/9780857090256>
- Mahmutyazicioglu, N., Albayrak, O., Ipekoglu, M., & Altintas, S. (2013). Effects of alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) addition on the cell structure and mechanical properties of 6061 foams. *Journal of Materials Research*, 28(17), 2509–2519. <https://doi.org/10.1557/jmr.2013.187>
- Mirzaei-Solhi, A., Khalil-Allafi, J., Yusefi, M., Yazdani, M., & Mohammadzadeh, A. (2018). Fabrication of aluminum foams by using CaCO<sub>3</sub> foaming agent. *Materials Research Express*, 5(9). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aad88a>
- Morello, L., Rosti Rossini, L., Pia, G., & Tonoli, A. (2010). *The Automotive Body: Volume II: System Design (Mechanical Engineering Series)* (2011th ed.). Springer.
- Nakazawa, Y., Tamura, K., Yoshida, M., Takagi, K., & Kano, M. (2005). Development of



- crash-box for passenger car with high capability for energy absorption. *International Conference on Computation Plasticity (COMPLAS), VIII*.
- Nasrabadi, A. A. M., Hedayati, R., & Sadighi, M. (2016). Numerical and experimental study of the mechanical response of aluminum foams under compressive loading using CT data. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics (Poland)*, 54(4), 1357–1368. <https://doi.org/10.15632/jtam-pl.54.4.1357>
- Nawaz, A., & Rani, S. (2021). Fabrication and evaluation of percent porosity and density reduction of aluminium alloy foam. *Materials Today: Proceedings*, 47(xxxx), 6025–6029. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.607>
- Paul, A., & Ramamurty, U. (2000). Strain rate sensitivity of a closed-cell aluminum foam. *Materials Science and Engineering A*, 281(1–2), 1–7. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00750-9](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00750-9)
- Rajak, D. K., Mahajan, N. N., & Das, S. (2019). Fabrication and investigation of influence of CaCO<sub>3</sub> as foaming agent on Al-SiCp foam. *Materials and Manufacturing Processes*, 34(4), 379–384. <https://doi.org/10.1080/10426914.2018.1532093>
- Renreng, I., Djamaluddin, F., & Furqani, F. (2020). Energy Absorption Analysis of aluminum Filled Foam Tube under Axial Load using Finite Element Method with Cross Section Variations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 875(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/875/1/012060>
- Riyanto, I. B. (n.d.). *Pengaruh Penambahan Foaming Agernt CaCO<sub>3</sub> Terhadap Pembentukan dan Karakteristik dari Aluminium Foam*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sanjaya, V. P. (2022). *ANALISIS PENGARUH HEAT TREATMENT TERHADAP KARAKTERISTIK DAN SIFAT MEKANIK ALUMINIUM FOAM DENGAN MENGGUNAKAN STABILIZER Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> DAN FOAMING AGENT CaCO<sub>3</sub>*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sathurusinghe, S. A. S. P., Herath, K. R. B., & Herath, S. R. (2012). Elastic properties of open cell metallic foams using finite element analysis and homogenization technique. *45th Institute of Engineers Pakistan Convention, December, 2*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2325.3606>
- Sinaga, S. A. P. (n.d.). *KARAKTERISASI POROSITAS DAN SIFAT MEKANIK ALUMINIUM FOAMS DENGAN VARIASI HOLDING TEMPERATURE MENGGUNAKAN STABILIZER Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> DAN FOAMING AGENT CaCO<sub>3</sub>*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Song, Z. L., Ma, L. Q., Wu, Z. J., & He, D. P. (2000). Effects of viscosity on cellular structure of foamed aluminum in foaming process. *Journal of Materials Science*, 35(1), 15–20. <https://doi.org/10.1023/A:1004715926692>
- Sosnick, B. (1948). *Process For Making Foamlike Mass Of Metal*. <https://patents.google.com/patent/US2434775A/en>
- Sutarno, Nugraha, B., & Kusharjanto. (2017). Optimization of calcium carbonate content on synthesis of aluminum foam and its compressive strength characteristic. *AIP Conference Proceedings*, 1805, 1–10. <https://doi.org/10.1063/1.4974439>
- Sutarno, Soepriyanto, S., Korda, A. A., & Dirgantara, T. (2015). Pengaruh Kalsia Alumina (CaO . Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Pada Busa Aluminium AL-7000. *Prosiding Simposium Nasional Inovasi Dan Pembelajaran Sains 2015, 2015(Snips)*, 149–152.
- Tegethoff, F. W. (2001). *Calcium Carbonate: From the Cretaceous Period into the 21st Century* (1st ed.). Birkhäuser.
- Wan, T., Liu, Y., Zhou, C., Chen, X., & Li, Y. (2021). Fabrication, properties, and applications of open-cell aluminum foams: A review. *Journal of Materials Science and Technology*, 62, 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.05.039>

- 
- Widyastuti, Ardhyanta, H., Purwaningsih, H., & Quluq, R. M. (2019). Karakterisasi Material. In *ITS Press*.
- Yu, C.-J., & Banhart, J. (1998). Mechanical Properties of Metallic Foams. *Bremen, January*, 37–48.
- Yusof, N. S. B., Sapuan, S. M., Sultan, M. T. H., Jawaid, M., & Maleque, M. A. (2017). Design and materials development of automotive crash box: a review. *Ciencia e Tecnologia Dos Materiais*, 29(3), 129–144. <https://doi.org/10.1016/j.ctmat.2017.09.003>
- Zhang, X., Guo, M., Zhang, J., & Zhuang, L. (2016). Dissolution of Precipitates During Solution Treatment of Al-Mg-Si-Cu Alloys. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 47(1), 608–620. <https://doi.org/10.1007/s11663-015-0500-1>
- Zhou, Z., Zhou, K., Hou, X., & Luo, H. (2005). Arc/spark optical emission spectrometry: Principles, instrumentation, and recent applications. *Applied Spectroscopy Reviews*, 40(2), 165–185. <https://doi.org/10.1081/ASR-200052001>

## LAMPIRAN

### Proses Pengecoran

Proses pengecoran dilakukan menggunakan *burner* milik laboratorium ekstraksi. Pengecoran dilakukan dengan cara melelehkan Al 6061 ke dalam *burner* dan ditahan pada temperatur 750°C hingga meleleh. Ketika telah meleleh, 5 wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ditambahkan ke dalam lelehan dan diaduk menggunakan bor dan pengaduk. Setelah itu, 1 wt% CaCO<sub>3</sub> ditambahkan dan diaduk. Proses ini akan menghasilkan gas CO<sub>2</sub> yang menyebabkan terbentuknya *foam*.



Proses pengecoran *aluminium foam* dalam *burner*.

Dalam proses pengecoran, terjadi beberapa kegagalan produksi *aluminium foam* karena beberapa hal. Pada Gambar di bawah, dapat dilihat bahwa *foam* yang terbentuk masih kurang dan masih 50% padat. Hal ini disebabkan oleh beberapa hal. Yang pengadukan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang kurang rata sehingga sel pori yang terbentuk mudah hancur dan tidak mampu menahan bentuknya. Setelah beberapa kali percobaan, ditemukan waktu pengadukan yang ideal yaitu selama 30 detik, menghasilkan *foam* yang bagus dan merata seperti pada Gambar di bawah.



Hasil pengecoran yang gagal (kiri), dan pengecoran yang berhasil (kanan).

Hasil Uji OES



POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA  
LABORATORIUM UJI BAHAN

OPTICAL EMISSION SPECTROSCOPY RESULT

No. SPK : - Penandaan : -  
Pelanggan : MHS T. MATERIAL - ITS Material : ALUMINIUM 6061  
Proyek : - Dimensi : DIA, 44x30mm  
Kepala Lab. : - Heat No. : -  
Program : AL\_000 Keterangan : -

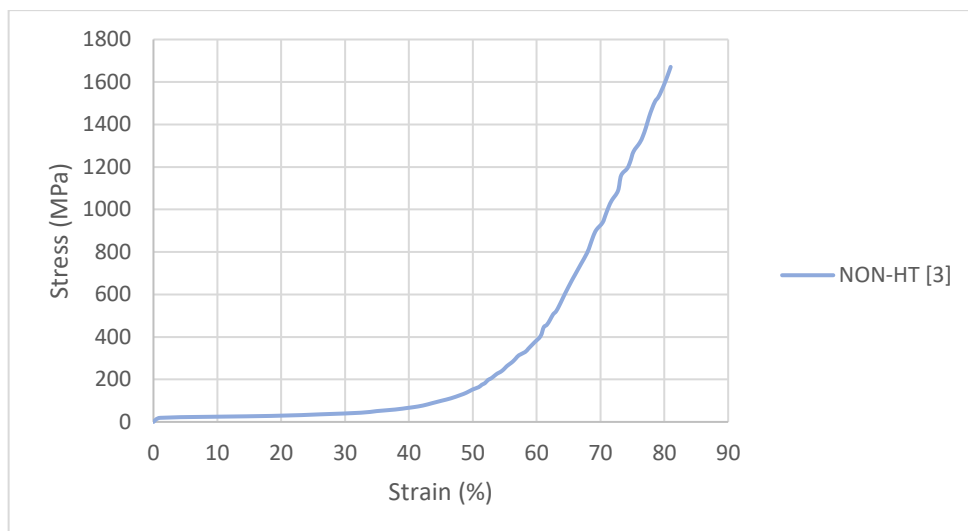
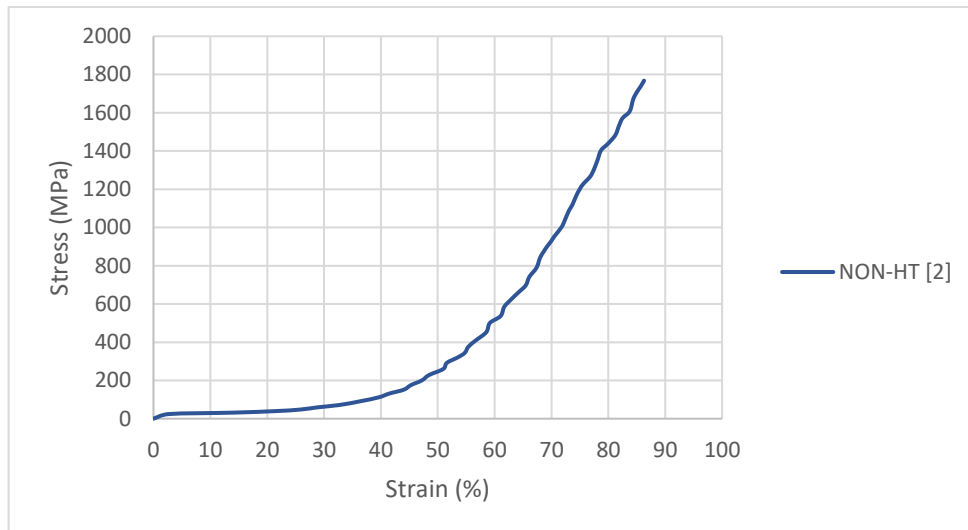
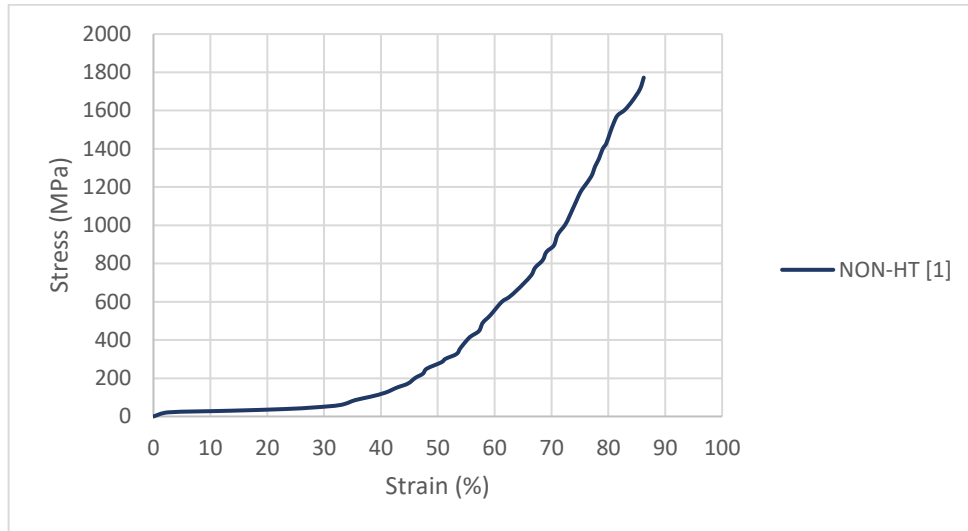
	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr
1	97.8	0.611	0.250	0.289	0.0139	0.775	0.0192	0.0937
2	97.9	0.611	0.224	0.299	0.0129	0.740	0.0144	0.0938
3	97.8	0.611	0.215	0.286	0.0124	0.740	0.0175	0.0926
4	97.8	0.613	0.221	0.283	0.0135	0.757	0.0212	0.0942
Ave	97.8	0.612	0.227	0.289	0.0132	0.753	0.0181	0.0936
	Ni	Ti	Be	Ca	Li	Pb	Sn	Sr
1	0.0083	0.0266	< 0.0001	0.0003	0.0001	0.0035	0.0100	0.0001
2	0.0070	0.0234	< 0.0001	0.0004	< 0.0001	0.0034	< 0.0005	0.0001
3	0.0068	0.0215	< 0.0001	0.0001	0.0001	0.0075	0.0019	0.0001
4	0.0066	0.0233	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.0041	0.0329	< 0.0001
Ave	0.0072	0.0237	< 0.0001	0.0002	0.0001	0.0046	0.0112	0.0001
	V	Na	Bi	Zr	B	Ga	Cd	Co
1	0.0170	0.0022	< 0.0005	0.0023	0.0014	0.0137	0.0005	< 0.0010
2	0.0131	0.0020	< 0.0005	< 0.0003	0.0012	0.0123	< 0.0001	< 0.0010
3	0.0167	0.0019	< 0.0005	0.0032	0.0014	0.0129	0.0005	< 0.0010
4	0.0166	0.0019	< 0.0005	0.0034	0.0018	0.0121	< 0.0001	< 0.0010
Ave	0.0159	0.0020	< 0.0005	0.0022	0.0014	0.0127	0.0002	< 0.0010
	Ag	Hg	In	Sb	P	As	Ce	La
1	0.0031	< 0.0005	0.0046	0.0229	< 0.0020	0.0051	0.0046	0.0021
2	< 0.0001	< 0.0005	0.0026	< 0.0050	< 0.0020	0.0056	0.0065	0.0034
3	< 0.0001	< 0.0005	0.0057	0.0716	< 0.0020	< 0.0030	0.0044	0.0034
4	0.0008	< 0.0005	< 0.0020	< 0.0050	< 0.0020	< 0.0030	0.0045	0.0022
Ave	0.0010	< 0.0005	0.0037	0.0243	< 0.0020	0.0034	0.0050	0.0028

Surabaya, 4/22/2022

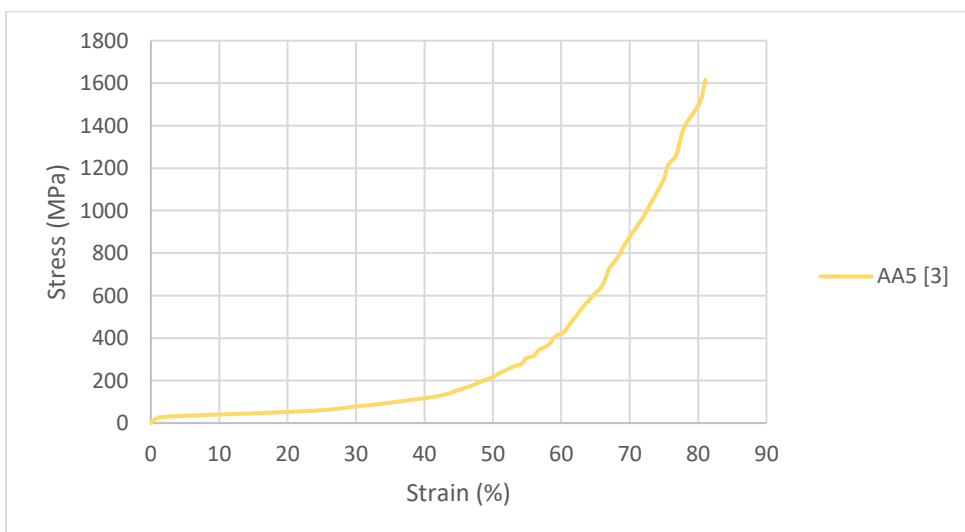
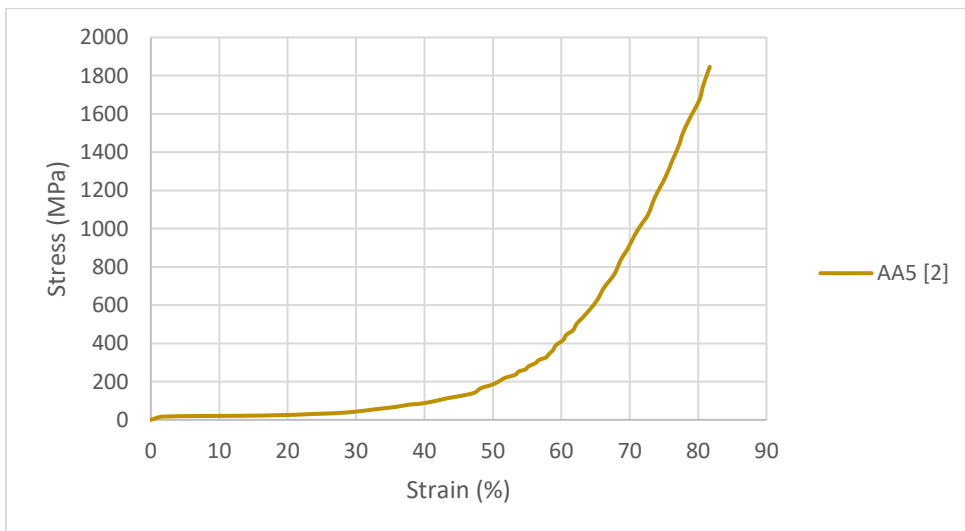
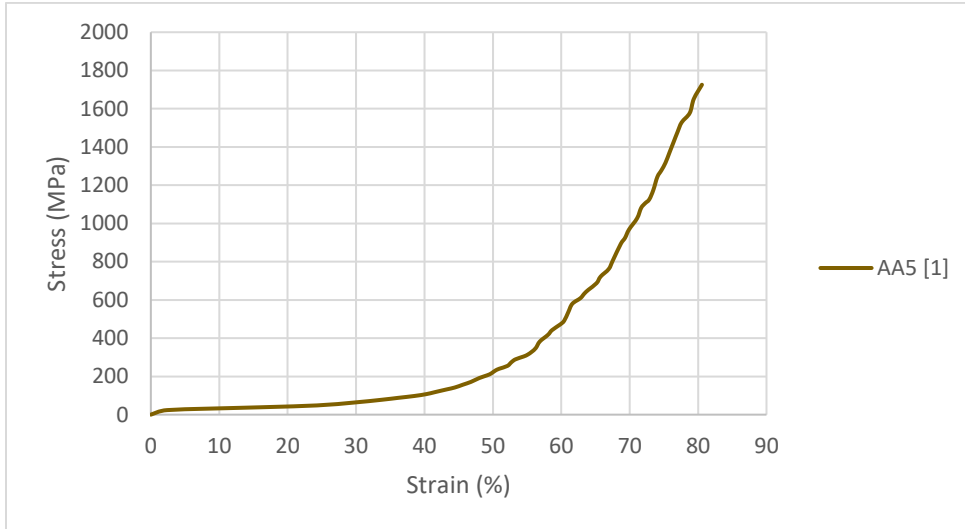
Diuji oleh: -

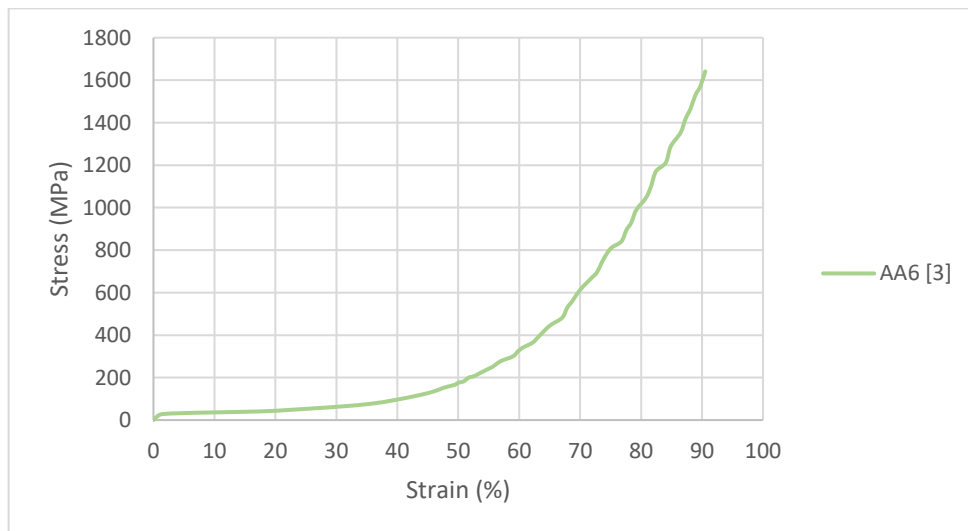
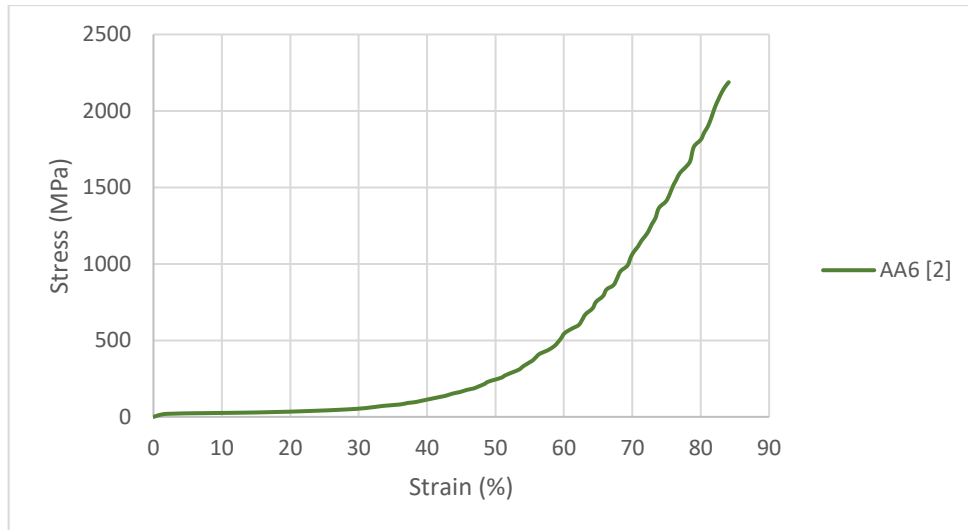
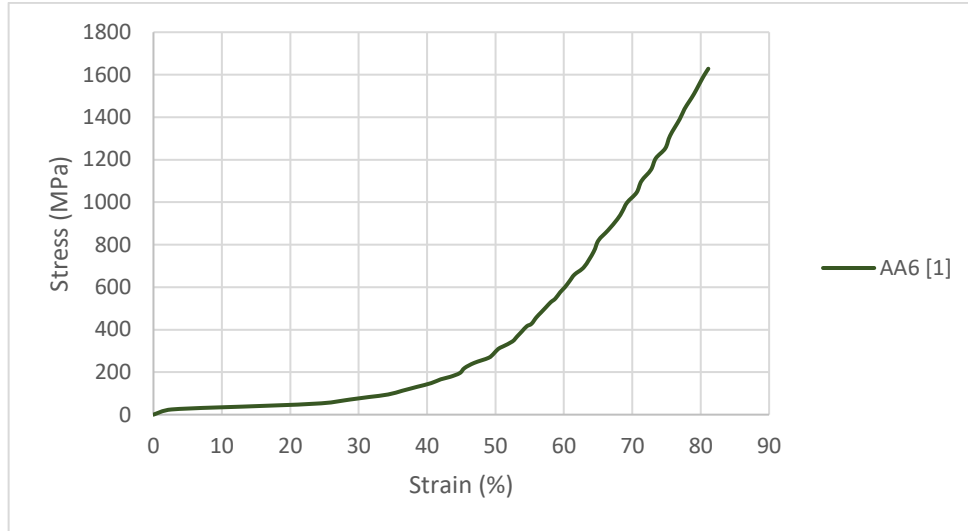
Jl. Teknik Kimia, Kampus ITS Sukolilo Surabaya (Indonesia)  
Tel. : +62 31 5999444 Fax: +62 31 5999444

### Grafik Kompresi

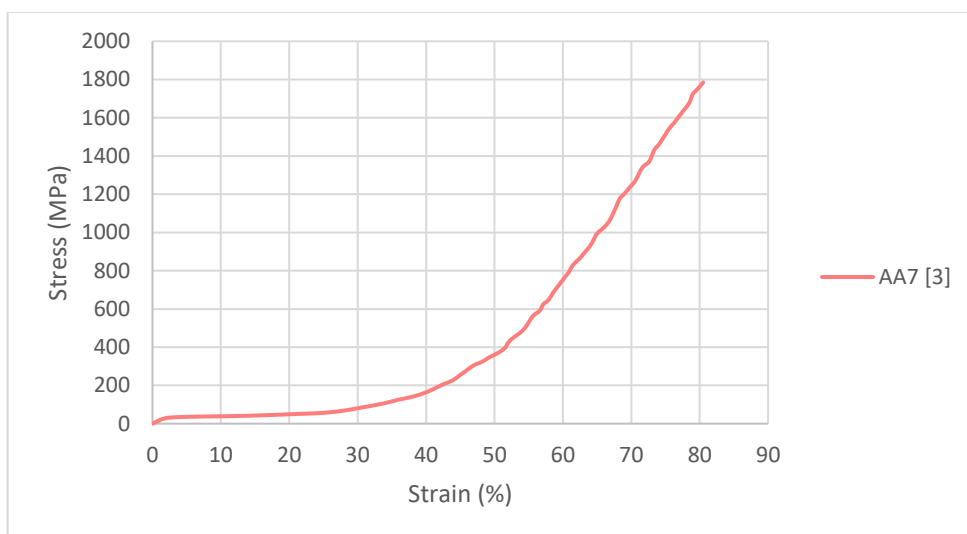
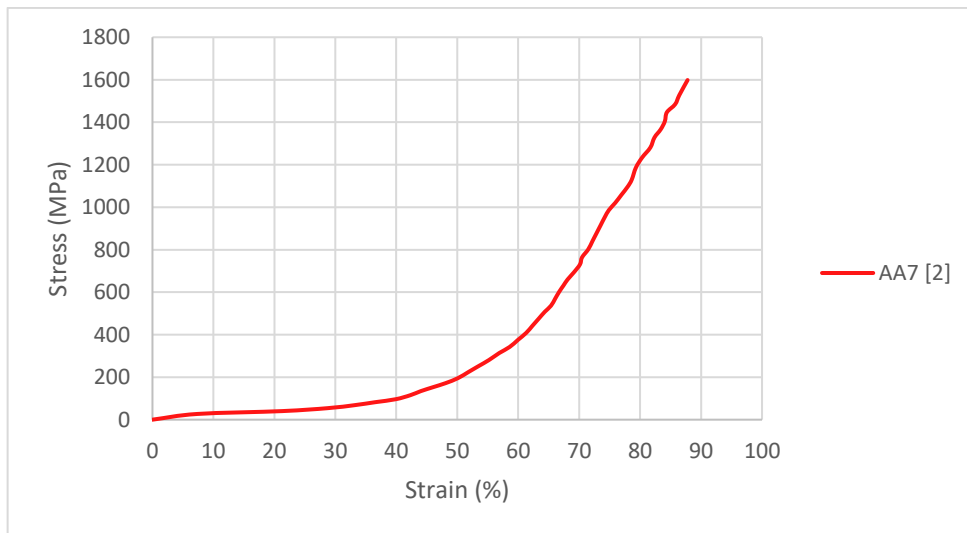
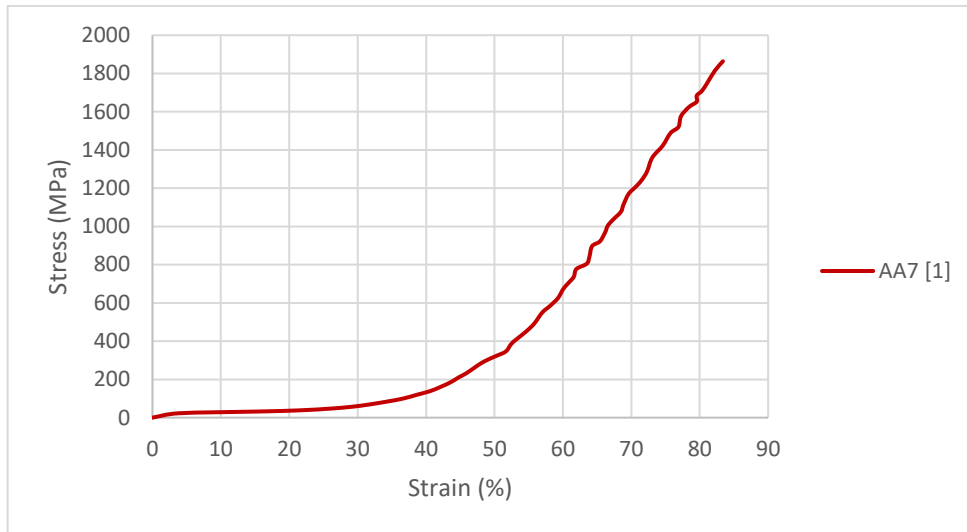


LAPORAN TUGAS AKHIR  
TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI





LAPORAN TUGAS AKHIR  
TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI





**Perhitungan Kompresi**

<b>Spesimen</b>	<b>Plateau Stress (MPa)</b>	<b>Plateau Stress Avg. (MPa)</b>	<b>Plateau End Stress (MPa)</b>	<b>Plateau End Stress Avg. (MPa)</b>
NON-HT [1]	76.7585854 7		99.78616111	
NON-HT [2]	59.4919786 1	62.15512895	77.33957219	80.80166764
NON-HT [3]	50.2148227 7		65.2792696	
SHT100 AA5 [1]	74.8860826 9		97.3519075	
SHT100 AA5 [2]	59.4262295 1	70.64514618	77.25409836	91.83869003
SHT100 AA5 [3]	77.6231263 4		100.9100642	
SHT100 AA6 [1]	69.0815479 6		89.80601235	
SHT100 AA6 [2]	78.4646739 1	76.24089749	102.0040761	99.11316673
SHT100 AA6 [3]	81.1764705 9		105.5294118	
SHT100 AA7 [1]	81.740347		106.2624511	
SHT100 AA7 [2]	76.0071811 1	85.58944196	98.80933544	111.2662746
SHT100 AA7 [3]	99.0207977 8		128.7270371	

<b>Spesimen</b>	<b>Plateau End Strain (%)</b>	<b>Plateau End Strain Avg. (%)</b>	<b>Energy Absorption (MJ/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Energy Absorption Avg. (MJ/m<sup>3</sup>)</b>
NON-HT [1]	38.1730518		18.5205889	
NON-HT [2]	32.6815071 2	36.87768285	12.164802	14.60236077
NON-HT [3]	39.7784896 4		13.1216914	
SHT100 AA5 [1]	38.5048370 6		18.1637184	
SHT100 AA5 [2]	37.7846744 3	37.81177849	11.9631863	16.8792902
SHT100 AA5 [3]	37.1458239 7		20.5109659	
SHT100 AA6 [1]	34.3102072 7		15.9700257	
SHT100 AA6 [2]	39.1685771 4	37.68864681	16.2415418	17.22263533

LAPORAN TUGAS AKHIR  
TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI



---

SHT100	AA6	39.5871560			
[3]		1		19.4563385	
SHT100	AA7	36.7241379			
[1]		3		15.143711	
SHT100	AA7	39.9268811	37.55218287	17.450774	17.3427475
[2]					
SHT100	AA7	36.0055295			
[3]		8		19.4337575	

---

**Perhitungan Impak**

Spesimen	Initial deg. (θ)	Final deg. (θ)	Impact Energy (Joule)	Impact Energy Avg. (Joule)	Impact Strength (kJ/m <sup>2</sup> )	Impact Strength Avg. (kJ/m <sup>2</sup> )
NON-HT [1]	150	146	0.131146		1.639319	
NON-HT [2]	150	142	0.276612	0.215566	3.457648	2.694574
NON-HT [3]	150	143	0.23894		2.986754	
SHT100 AA5 [1]	150	141	0.315135		3.939181	
SHT100 AA5 [2]	150	136	0.520094	0.358056	6.501179	4.475705
SHT100 AA5 [3]	150	143	0.23894		2.986754	
SHT100 AA6 [1]	150	141	0.315135		3.939181	
SHT100 AA6 [2]	150	135	0.563468	0.385072	7.043353	4.813394
SHT100 AA6 [3]	150	142	0.276612		3.457648	
SHT100 AA7 [1]	150	142	0.276612		3.457648	
SHT100 AA7 [2]	150	131	0.744465	0.420006	9.305815	5.250072
SHT100 AA7 [3]	150	143	0.23894		2.986754	

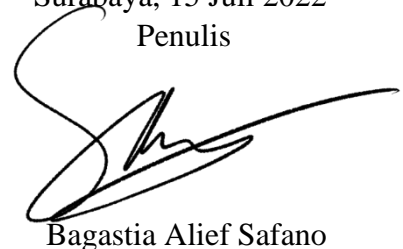
## UCAPAN TERIMA KASIH

Selama masa penelitian ini, sangat banyak dukungan yang diterima oleh penulis dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis hendak menyampaikan rasa terima kasih yang sepenuhnya ke seluruh pihak tersebut, yang di antaranya adalah:

1. Orang tua, adik-adik, serta keluarga besar penulis yang senantiasa memberikan dukungan dan doa,
2. Seluruh dosen yang telah membantu, membimbing, serta memberikan ilmu selama masa perkuliahan,
3. Hanggoro Putra Pramudya Gianto sebagai partner tugas akhir dan teman bermain, serta Miftakhul Arzaq Chusnul Maulana Ischaq, Reynald Renanda Maulidana, dan Muhamad Zaki Ramadhan sebagai rekan satu dosen bimbingan,
4. Anggota Laboratorium Metalurgi dan Manufaktur serta Laboratorium Pengolahan Mineral dan Material yang membantu kelancaran dilakukannya penelitian,
5. Pak Sumarsono dan Pak Basuki yang telah membimbing dan membantu dalam penggunaan peralatan Laboratorium Pengolahan Mineral dan Material,
6. Pak Asman yang telah membimbing dan membantu dalam penggunaan peralatan Laboratorium Metalurgi dan Manufaktur, dan juga membantu dalam pengujian kompresif,
7. Anggota Ngebut yang selalu menemani dan memberi dukungan kepada penulis sepanjang masa perkuliahan,
8. Sheruru M., Farid G., Chris P. "Shen" Cox, serta Kyra Allison sebagai anggota tim Liga Legenda bersama penulis sepanjang masa perkuliahan.
9. Haniffyah, Rey R., Calvin E., Tyrone Rifky, serta anggota DWC lainnya yang selalu ada memberikan bantuan emosional,
10. Keluarga besar MT20 yang telah menemani dan mewarnai kehidupan perkuliahan penulis dari awal hingga akhir,
11. Dan juga seluruh pihak lainnya yang telah menjadi bagian dari kehidupan penulis hingga sekarang yang tak mungkin disebutkan satu per satu.

Demikian penulis menulis ucapan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah disebut, yang telah membantu kelancaran perkuliahan penulis hingga sampai ke titik ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat untuk semua yang membacanya, terutama demi kemajuan Teknik Material dan Metalurgi ITS dan juga Indonesia.

Surabaya, 15 Juli 2022  
Penulis



Bagastia Alief Safano

## **BIODATA PENULIS**



Bagastia Alief Safano lahir di Biak pada tanggal 06 April 2000. Merupakan anak pertama dari 4 bersaudara. Bertempat tinggal di Perumahan Haji Kota Bogor Blok B No. 2. Riwayat pendidikan masuk ke SD Hang Tuah 10 Juanda dan lulus pada tahun 2012, kemudian SMP di SMPN 1 Sedati hingga tahun 2014. Penulis berpindah ke Kota Bogor pada tahun 2014 dan masuk ke SMPN 3 Kota Bogor dan lulus pada tahun 2015, dan melanjutkan pendidikan ke SMAN 6 Kota Bogor dan lulus pada tahun 2018. Kemudian melanjutkan ke dunia perkuliahan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada Departemen Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem angkatan 2018. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif di Himpunan Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi dan menjabat sebagai staff ahli di Departemen Hubungan Luar. Penulis dapat dihubungi melalui nomor telepon +6285771955772 dan alamat email [bagastia.as@gmail.com](mailto:bagastia.as@gmail.com).

